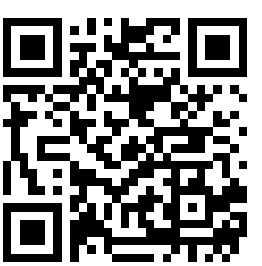
This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

Google™ books

https://books.google.com



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

ATTI

DEL

130339

CONGRESSO INTERNAZIONALE

DELLE

APPLICAZIONI ELETTRICHE

tenutosi in Torino dal 10 al 16 settembre 1911

VOLUME II

Rapporti, Comunicazioni e Discussioni

TORINO
VINCENZO BONA
Tipografo delle LL. MM. e dei RR. Principi

1912

Digitized by Google

Digitized by Google

ATTI

DEL

Congresso Internazionale delle Applicazioni Elettriche

(Torino, 1911)

Digitized by Google

Digitized by Google

ATTI

DEL

130339

CONGRESSO INTERNAZIONALE

DELLE

APPLICAZIONI ELETTRICHE

tenutosi in Torino dal 10 al 16 settembre 1911

VOLUME II

Rapporti, Comunicazioni e Discussioni

BIBLIOTH DE LA VILLE DE LYON

TORINO
VINCENZO BONA
Tipografo delle LL. MM. e dei RR. Principi

1912

Digitized by Google

Proprietà Letteraria

(6008-04)

Digitized by Google

NOTA DEI REDATTORI

Nella presente pubblicazione i lavori presentati al Congresso furono distribuiti, per quanto possibile, in ordine di materie: quindi anzitutto venne fatta una suddivisione in Sezioni, nell'ordine stesso in cui le Sezioni vennero numerate per il Congresso: in ciascuna Sezione poi si è tentato di raggruppare i diversi lavori a seconda dell'argomento trattato, senza fare distinzione fra Rapporti Ufficiali e Comunicazioni, dando però (salvo qualche caso speciale) ai primi la precedenza sulle seconde. A ciascun lavoro fu fatto seguire il riassunto francese, e quindi la discussione, in quanto abbia avuto luogo.

A questa regola però fanno eccezione alcuni lavori per i quali la discussione fu comune. In questo caso, naturalmente, la discussione viene in seguito alla pubblicazione di tutti i lavori a cui si riferisce.

La Commissione degli Atti avrebbe potuto pubblicare le discussioni conservando a ciascun oratore la lingua originaria in cui pronunziò le sue parole; ma, sia perchè i segretari di Sezioni raccolsero per lo più in lingua francese i sunti delle

Digitized by Google

discussioni stesse, sia perchè la generalità di quelli che vi presero parte parlò in tale lingua, credette che fosse più chiaro e semplice il redigere l'intera discussione nella sola lingua francese. Avrebbe potuto aggiungere anche una versione italiana delle discussioni stesse, ma, data la universale conoscenza della lingua francese in Italia, credette ciò un ingombro inutile agli Atti.

L'ordine effettivo in cui il lavoro del Congresso si svolse, e le altre notizie relative alle sedute stesse, si trovano invece nei verbali riportati nel volume I di questa pubblicazione.

Il Segretario Generale e Relatore

G. SEMENZA.

Digitized by Google

NOTE DES RÉDACTEURS

Dans la présente publication les travaux soumis au Congrès ont été, autant que possible, classés suivant l'ordre des matières, en suivant d'abord la division des Sections fixée pour le Congrès, et en s'efforçant de grouper les différents mémoires par nature de sujets, sans distinguer entre les Rapports Officiels et les Communications, mais en réservant la priorité aux premiers, sauf quelques exceptions. Chaque mémoire a été accompagné d'un résumé en langue française, et de la discussion qui suivit, le cas échéant. Cette règle n'a été enfreinte que pour ceux des mémoires ayant donné lieu à une discussion commune; dans ce cas, celle-ci a été reportée à la suite des travaux auxquels elle se référait.

La Commission des Actes aurait pu, en publiant les discussions, conserver à chaque orateur l'idiome dans lequel il s'est exprimé; mais, soit parce que MM. les Secrétaires des Sections ont, pour la plupart, transcrit en français les résumés des discussions, soit parce que le plus grand nombre de ceux qui ont participé à ces discussions ont effectivement employé

Digitized by Google

cette langue, on a cru bon, en vue d'une plus grande clarté à donner à l'ensemble des comptes-rendus, de les publier tous en français. On aurait pû, il est vrai, faire suivre chaque compte-rendu d'une version italienne, mais la langue française est tellement répandue en Italie, qu'il a semblé inutile d'augmenter ainsi le volume des Actes.

La succession réelle des travaux du Congrès ainsi que tous autres renseignements relatifs aux séances, se retrouveront dans les procès-verbaux contenus dans le premier volume de la présente publication.

Le Secrétaire Général et Rapporteur

G. SEMENZA.

Digitized by Google

Sezione I

MACCHINE ELETTRICHE E TRASFORMATORI

Presidente	P. BOUCHEROT	(Francia)
Vice Presidenti	E. MORELLI	(Italia)
	C. FELDMANN	(Olanda)
Segretario	C. PALESTRINO	(Italia)

Digitized by Google

Digitized by Google

Charakteristische und mechanische Eigenschaften moderner Generatoren insbesondere solcher höherer Tourenzahl.

Rapporto sul tema N. I del Congresso.

Relatore Dr. HANS BEHN-ESCHENBURG

Direktor der Maschinenfabrik Oerlikon.

a) Allgemeine Betrachtungen über den Entwicklungsgang moderner Generatoren.

Bevor einige Eigenschaften moderner Generatoren aufgezählt werden, soll der Entwicklungsgang unserer Konstruktionen vom allgemeinen Standpunkt aus betrachtet werden.

Wenn wir allgemein, sei es aus Bedürfnis, Angewöhnung oder Mode eine neue Sache oder eine neue Form gebrauchen und mit ihr rechnen, deren Verwendung vor einem bestimmten Zeitabschnitt von niemandem geahnt worden ist, so nennen wir die neue Erscheinung modern, sowohl die Sache selbst als auch den Zeitabschnitt. Je weiter wir die Zeit fassen, desto mehr moderne Erscheinungen fallen hinein. Der Bau elektrischer Maschinen ist modern, wenn wir bis 1830 zurückblicken, wo Faraday anfing elektromagnetische Experimente zu verfolgen. Das Mehrphasenstrom-System ist moderner; 1888 behauptete noch Ferraris am Schlusse seiner klassischen Abhandlung, dass das von ihm entdeckte Drehfeld keine praktische Ausbeutung gestatte. Was ist nun heute das Merkmal eines modernen elektrischen Generators, wie weit sollen wir zurückgehen, um auf einen Stand der Elektrotechnik zu stossen, bei welchem der Gebrauch von Generatoren, über die wir heute allgemein verfügen können, undenkbar erschien.

Im Jahre 1900 haben an der Ausstellung in Paris alle bedeu-

Digitized by Google

tenden Firmen ihr Neuestes und Grösstes an elektrischen Maschinen aufgetischt. Damals hätte es den Konstrukteuren und Unternehmern von elektrischen Anlagen als unmöglich und absurd erscheinen müssen, Drehstromgeneratoren in Einheiten von 10.000 PS. Leistung bei 1500 Touren und Gleichstromgeneratoren in Einheiten von 1500 PS. bei 1500 Touren und 4000 PS. bei 300 Touren allgemein zu verwenden. Noch vor 5 Jahren konnte man von tüchtigen Konstrukteuren den Beweis hören, dass bei 3000 Touren keine grösseren Drehstromgeneratoren als bis zu einer Leistung von 1000 Kw. und bei 1500 Touren bis 5000 Kw. herauszubringen seien. Darin scheint mir das bemerkenswerte Moderne in der Baukunst elektrischer Generatoren zu liegen, dass mit einem Male die bedeutendsten Schranken der Leistung, die ein einzelner Pol eines Generators übernehmen kann, gefallen zu sein scheinen. Wer mitten in dem Entwicklungskampfe der Konstruktionen steht, kann sich nur schwer besinnen, wann der erste Anstoss zu einer neuen Form und zu neuen Dimensionen wirklich für ihn und für seine Konkurrenten gekommen ist.

Wie in der organischen Welt der Kampf ums Dasein aus dem Chaos der Varianten die überlegeneren Formen schafft, so findet in Kampfe der Konkurrenz unter den Spekulationen der Erfinder und Konstrukteure eine Auslese derjenigen Formen und Dimensionen statt, die sich vorteilhaft äussern und bewähren und dadurch zu vorbildlichen Typen berufen werden. Ohne das Drängen des Marktes, der skrupellos neue Probleme und Aufträge verteilt und unaufhörlich rücksichtslos Ersparnissen und Verbesserungen gebietet, würde kaum eine Erfindung zur praktischen Anwendung gelangen. Die geistreichsten Vorschläge verfallen unbeachtet der Vergessenheit, wenn zu ihrer Zeit kein Bedürfnis nach ihnen verlangte. Oft taucht das Bedürfnis viel später auf und dann wird die alte Erfindung als Kuriosum angestaunt, nachdem sie von neueren selbstständig wiederholt worden ist. Man denke z. B. an die Kompensation der Gleichstrommaschinen, ohne die seit etwa 8 Jahren keine moderne Maschine mehr auskommen kann und die doch schon im Jahre 1884 von Menges vollständig modern beschrieben worden ist. Das Wechselspiel zwischen Markt und Konstrukteur verwickelt und verdunkelt die Geschichte jeder Erfindung und Neuerung. Neben dem Markt bringt freilich auch die Not Erfindungen hervor. Es ist eine Erfahrungsregel, die jeder ältere

Digitized by Google

Praktiker anerkennen wird, dass bei der Ausführung jeder neuen Konstruktion unvorhergesehene Nebenerscheinungen, Fehler und Störungen auftreten, die durch nachträgliche Erfindungen beseitigt werden müssen. Auch neue Erscheinungen des Betriebes arbeiten unablässig an einer vollkommeneren Anpassung der Maschinen und ergänzen alte Schwächen und Hemmungen in der Konstruktion durch Neuerungen. Der Fortschritt wird dem Konstrukteur unerbittlich von aussenaufgezwungen.

An allen Enden wird von Tausenden, die getrennt arbeiten, Schritt für Schritt und Stufe um Stufe ein kleiner Vorteil nach dem andern erobert, jeder Vorsprung des einen Konstrukteurs wird aber auf dem Markte von den Wettbewerbern sofort empfunden und es darf keiner ruhen, bis er den Vorsprung des andern eingeholt hat. Wenn man sich einmal umschaut im Wettkampf, so sieht man gewöhnlich die Kämpfenden nahe beieinander und ist erstaunt, wie weit die ganze Gruppe plötzlich vorwärts geeilt und gestiegen ist. Erstaunlich ist aber auch, wie schnell die Stufen des Entwicklungskampfes selbst vergessen werden und wie alltäglich und selbstverständlich heute die Formen erscheinen, die vor kurzer Zeit als unmöglich gegolten haben.

Es soll hier hervorgehoben werden, dass die Steigerung der Leistung und Geschwindigkeit der elektrischen Generatoren bedingt ist durch die vorausgehende Steigerung der Antriebsmotoren, der Dampf- und Wasserturbinen; ohne gleichwertige Antriebsmotoren hätten elektrische Generatoren keinen Sinn, umgekehrt ist der Ausweg geschaffen worden unter Addition kleinerer Einheiten von Generatoren einen leistungsfähigeren Antriebsmotor zu benutzen. Heute sind die Grenzen der elektrischen Generatoren nur noch an die wirtschaftlichen und technischen Grenzen der Antriebsmotoren gebunden. Die Hilferufe der Dampfturbinenbauer, die schon vor 5 Jahren ihre Leistungen bei 3000 und 1500 Touren zu erhöhen suchten, sind erhört. Es ist möglich, dass der Wirtschaftlichkeit der Anlagen mit der Steigerung der ungeheuren Einheiten ins Unbegrenzte nicht gedient ist, dann wird diese Steigerung von selbst aufhören [1]. Unsere modernen Generatoren, auf die wir heute stolz sind,

---

[1] Vgl. E. HUBER, *Ueber die Grenzen des Maschinenbaues*, Vortrag vor der naturforschenden Gesellschaft Zürich, 21 Febr. 1911.

Digitized by Google

werden im Augenblick veralten und verschwinden, sobald neue ökonomischere Antriebsmotoren andere Leistungseinheiten und Geschwindigkeiten bedingen, und vielleicht ist dann unsere heutige Kunst und Erfahrung in Bau von Generatoren bei den neuen Konstruktionen völlig wertlos. Sie wird auch verschwinden und veralten, wenn wesentlich neue Energie- oder Stromformen eine weitere Verbreitung als die alten Systeme finden würden, z. B. wesentlich höhere Periodenzahlen, neue Kraftakkumulierungseinrichtungen u. s. w.

b) Tabelle einiger moderner Generatoren.

Nach den Angaben einiger Konstruktionsfirmen lassen sich folgende in Ausführung oder Konstruktion begriffenen Generatoren zusammenstellen, deren Leistung und Geschwindigkeit weit über das vor einigen Jahren Geahnte hinausgeht.

Drehstromgenerator mit Dampfturbine.

1)	3000	Umdr.	A. E. G.	4.400	Kw.	50	per.	
2)	3600	„	Westinghouse Co.	3.125	„	60	„	Stator 15 T. Rotor 4,5 T.
3)	3000	„	M. F. Oerlikon	3.760	„	50	„	Stator 14 T. Rotor 4, 4 Lagerg. 5, 4
4)	1500	„	Westinghouse	10.000	„	25	„	Stator 70 T. Rotor 27 T.
5)	—	„	A. E. G.	12.000	„	50	„	
6)	—	„	M. F. Oerlikon	12.500	„	50	„	Stator 36 t. Rotor 18 t. Lagerg. 13 t.
7)	1000	„	Brown, Boveri	21.500	„	50	„	
8)	—	„	A. E. G.	21.500	„	50	„	
9)	720	„	G. E. C.	20.000	„	60	„	
	750	„	G. E. C.	14.000	„	25	„	Stator 87 T. Rotor 49 T. (vertikal)
	750	„	B. B. Cie.	12.500	„	25	„	
			M. F. O. Projekt	18.000	„	25	„	Stator 59 T. Rotor 41 Lagerg. 30.

Im Jahre 1906 behandelte die M. F. O. für 3000 Umdrehungen

Digitized by Google

als höchste Leistung 1000 Kw., das Gewicht eines solchen Generators betrug:

		Stator	10,5
		Rotor	3,2
		Lagerg.	4,9.
Im Jahre 1906:			
für 1500 Touren	4000 Kw.	Stator	21,5
		Rotor	12
		Lagerg.	11.
Im Jahre 1907:			
für 5500 Kw.	1500 t.	Stator	26
		Rotor	15
		Lagerg.	13.

Vgl. hierzu eine interessante Tabelle von Herrn Lasche über die Entwicklung der Einheitsleistungen der Turbodynamos der A. E. G. Z. V. d. J. 1911. S. 1259. Die grösstmöglichen Grenzleistungen betragen: bei 3000 Touren 1904 1250 KVA., 1908 2000 KVA., 1911 4400 KVA., bei 1500 Touren 1905 3600 KVA., 1908 4500 KVA., 1911 12000 KVA., bei 1000 Touren 1906 6300 KVA., 1908 7500 KVA., 1911 21400 KVA.

Gleichstromgeneratoren mit Dampfturbinen.

2400 T.	B. B. & Cie.	400 Kw.	500 V.	2 Pole	
1250 T.	—	1200 „	480 V.	4	total c. 45 T.
1800 T.	G. E. C.	500 „	575 V.	4 Pole	Stator 6000 Kg. Rotor 2000 Kg.
1500 T.	A. E. G.	500 „	230 V.	4 polig	
2800 T.	—	300 „	450 V.		
1250 T.	—	1000 „	460 V.	6 polig	
1200 T.	M. F. O.	1100 „	350 V.	8 polig	Stator 7,3 T. Rotor 8,2 T. Lagerg. 8
1600 T.	—	750 „	440 V.	6 polig	Stator 5,2 T. Rotor 5 Lagerg. 5,3
1250 T.	S. S. W.	1250 „	800 V.		tot. 26 T.
1500 T.	—	1000 „	800 V.		19 T.
1500 T.	—	750 „	700 V.		15 T.
2500 T.	—	500 „	750 V.		9 T.
1050 T.	—	1650 „	550 V.	8 polig	Stator 13 T. Rotor 12 T. Lagerg. 12 T.

Digitized by Google

Drehstromgeneratoren mit mittleren Tourenzahlen.

Allmänna Svenska	14.450 PS.	250 Undrehg.	11.000 V.	50
Doppelgenerator		Stator 120 T.		
		Rotor 93 T.		
		Lagerg. 27 T.		
—	12.500 PS.	187,6 Umdrehg.	11.000 V.	25
		Stator 100 T.		
		Rotor 67 T.		
		Lagerg. 26 T.		
G. E. C.	14.000 Kw.	300 t.	50	
—	8.750 „	360 t.	60	
Westinghouse	5.000 „	514 t.	60	Rotor 18 t.
B. B. Cie.	17.000 „	250 t.	50	11.000 V.
—	10.200 „	900 t.	45	6.500 V.
—	6.600 „	420 t.	42	12.000
—	5.250 „	375 t.	50	Stator 27,5 T.
				Rotor 23,5
				Lagerg. 14,5
M. F. O.	4.000 „	600 t.	50	Stator 11 T.
				Rotor 10
				Lagerg. 4,8
—	9.000 „	333 t.	50	Stator 34 T.
				Rotor 36 T.
				Lagerg. 10.

Gleichstromgeneratoren mittlerer Umdrehungszahl.

Westinghouse	1500 Kw.	360 Umdrehg.	16 Pole	600 V.	
	Stator 16 t.	Rotor 8 t.	Lagerg. c. 7 t.		
—	2500 Kw.	300 Umdrehg.	14 Pole	575 V.	
	Stator 17 t.	Rotor 16,6 t.	Lagerg. c. 13 t.		
G. E. C.	1500 Kw.	360 Umdrehg.	12 Pole	600 V.	
	Stator 18 t.	Rotor 10 t.			
—	1000 Kw.	514 Umdrehg.	8 Pole	600 V.	
	Stator 9 t.	Rotor 6 t.			
M. F. O.	3000 Kw.	300 Umdrehg.	20 Pole	340 V.	
	Stator 20 t.	Rotor 23 t.	Lagerg. 10 t.		
			total 53 t.		
—	1200 Kw.	500 Umdrehg.	12 Pole	450 V.	
	Stator 7,5 t.	Rotor 6,6 t.	total 20 t.		

Digitized by Google

Cie. de l'Industrie électr. Genf. 1800 Kw. 500 Umdrehg.
600-900 V. 10 Pole 2 Kollektoren.

An der Ausstellung in Paris befand sich der damals grösste Generator der A. E. G.

3000 Kw. 83 Umdrehg. 6000 V. Stator 80 t. Rotor 70 t.

Ferner hatten einige Firmen ebenfalls ihre grössten Einheiten ausgestellt mit ähnlichen Umdrehungszahlen, so

2000 Kw. die Firma Helios
2000 „ „ Siemens & Halske
1760 „ „ Brown, Boveri & Cie.

Ausgeführt waren damals die Generatoren der G. E. C. für die Niagarafälle

3750 Kw. 250 t.,

ferner einige Generatoren von B. B. & Cie. und Oerlikon mit c. 1100 PS. bis 300 t.

Die Gewichte eines Drehstromgenerators der Maschinenfabrik Oerlikon für 1000 Kw. 224 Umdrehungen betrugen im Jahre 1899 38 T. 500 Kw. 500 Umdrehungen 11.800 Kg. Ein Gleichstromgenerator für 1000 Kw. mit c. 90 Umdrehungen vom Jahre 1900 besitzt

ein tot. Gewicht von 62 t. ohne Lager und Welle.

Für 500 Umdrehungen wurde für Gleichstromgeneratoren im Jahre 1900 eine Leistung von 150 Kw. nicht überschritten, für 250 Kw. galten 400 Umdrehungen als ein Wagnis. Die Gewichte eines 250 Kw. Generators, 500 Volt, 375 Umdrehungen betrugen:

Stator 4800 Kg. Rotor 3300 Kg. Lagerung 1700 Kg. 4 Pole.

350 Kw. 380 Umdrehungen 250 Volt Stator 4500 Rotor 4200 Lagerung 3000. 8 Pole.

c) Grundzüge der Konstruktion moderner Generatoren.

Obgleich sich die Kunst, die modernen rasch laufenden Generatoren zu bauen, so erstaunlich rasch und hoch entwickelt hat, so muss auffallen, wie wenig sich dabei die Prinzipien der Konstruktion, die Materialien, die inneren Eigenschaften der Regulierung und des Wirkungsgrades in den letzten Jahrzehnten verändert haben. Auch die Periodenzahlen und Spannungen der Generatoren sind im Allgemeinen gleich geblieben.

Einige Maschinentypen und Konstruktionsformen, die noch

Digitized by Google

zur Zeit der Ausstellung Paris beliebt waren und denen ihre Propheten eine bedeutende Zukunft voraussagten, sind heute ganz ausgestorben, z. B. der Induktor- oder Homopolartypus, die Wechselstromgeneratoren mit rotierendem induziertem System. Auch die Hochspannungs-Gleichstromgeneratoren haben sich nicht allgemein verbreitet, und ihr erster hervorragender Konstrukteur Thury hat keine Nachahmer hervorgezwungen. Die zahllosen sog. Kompoundierungseinrichtungen von Wechselstromgeneratoren haben jeweilen nur kurze Zeit vereinzelte Liebhaber gefunden, und es gilt heute die älteste Regulierungsmethode, die von jeher zur Regulierung von Dampfmaschinen und Turbinen benutzt wird, als modern. Ein besonderer durch ein Relais gesteuerter automatischer Regulator stellt die gewünschte Klemmenspannung her durch Nachregulieren der Gleichstromerregung. Die Regulatoren sind in den letzten Jahren so bedeutend verbessert worden, dass die alte Methode den höchst anspruchsvollen Markt erobert zu haben scheint, und die Nachfrage nach Kompoundierungen eine Zeit lang verstummen wird. Auch die Nachfrage nach Generatoren mit minimalen inneren Spannungsabfällen, durch welche die Dimensionierung und die Oekonomie so sehr erschwert wird, hat nur noch vereinzelte Bedeutung und tritt hinter dem Verlangen nach hohem Wirkungsgrad und geringen Kurzschlussströmen zurück. In Amerika tritt heute sogar die Vorschrift von grossen Spannungsabfällen auf, die zum Schutze gegen Kurzschlüsse künstlich mit Drosselspulen zu erreichen sind (Proceed. Americ. Instit. 1911, July-Aug.).

Es macht sich auf dem Markte eine durchgreifende Vereinfachung und Vereinheitlichung der Systeme geltend. Bei synchronen Wechselstromgeneratoren wird nur noch die Form mit feststehender Armatur und rotierenden mit Gleichstrom erregten Magnetpolen gepflegt. Die asynchronen Generatoren finden selten Anwendung und dürfen in diesem Zusammenhang ausgeschaltet werden. Der Bedarf an mit Kolbendampfmaschinen gekuppelten Generatoren ist rasch gesunken und hat seit einem Jahrzehnt keine wesentlichen Fortschritte in der Konstruktion mehr hervorgerufen. Auch die mit Dieselmotoren gekuppelten Generatoren, bei denen im Allgemeinen das Schwungrad mit einem Kranz nach innen stehender Pole aussen um die feststehende Armatur herum rotiert, zeigen keinen auffallenden Aufschwung in der Dimensionierung. Das hängt zusammen mit der verhältnismässig geringen Leistung der Motoren und der überwiegenden

Digitized by Google

Materialaufwand für die Schwungräder. Die Generatoren mit mittleren Umdrehungszahlen bis etwa 750 Touren haben Schritt gehalten mit der enormen Steigerung der Leistungsfähigkeit der Wasserturbinen und hier zeigt sich in den letzten 5 Jahren ein solcher Fortschritt in der Ausnutzung des Materials, dass heute die Generatoren bei gleicher Geschwindigkeit und gleichem Gewicht durchschnittlich das Doppelte leisten, während die Konstruktion selbst sowohl für die Magnetkörper als auch für die Armaturen bei Wechsel- und Gleichstrommaschinen die alten Anordnungen und Materialien beibehalten hat. Der Fortschritt ist hier stetig ohne jede Umwälzung vor sich gegangen und es kann ein eigentliches Merkmal für die moderne Kunst nicht festgestellt werden. Vor allen Dingen sind alle jenen Formen der Wicklung erkannt und mehr und mehr beseitigt worden, welche durch magnetische Streuung und Wirbelstromverluste eine Materialverschwendung bewirkten. Aus einer ersten groben Annäherung an die vollkommenen Wechselstrom- und Gleichstromgeneratoren bei der die zusätzlichen Verluste, die Streufelder, Ungleichförmigkeiten der Felder, die Oberschwingungen in Armatur und Magnetkörper noch einen wesentlichen Bruchteil der unumgänglichen Widerstands- und Hysteresisverluste, der Hauptfelder und Hauptschwingung ausmachten, sind die Generatoren zu einer zweiten Annäherung vorgerückt. Durch die Anordnung einer grösseren Zahl feinerer Nuten und lamellierter zweckmässig abgestufter Polschuhe durch die Unterteilung der induzierten Leiter, durch die Einrichtung wirksamer Dämpferwicklungen, durch die möglichst streuungslose Gegenüberstellung von Magnetspulen und induzierten Spulen, durch die Aufwendung von Blechen mit geringen magnetischen Verlusten ist es gelungen, die elektrischen und magnetischen Beanspruchungen des Materials, erheblich zu steigern, ohne die gesamten in Wärme umgesetzten Verluste zu erhöhen. Aber auch die mechanische Beanspruchung konnte gesteigert werden, indem in der Konstruktion jene gefährlichen Gussformen vermieden werden, die keine bis in das Innerste gehende Zuverlässigkeit gestatten. Es werden geschmiedete Stahlkörper verwendet, deren Festigkeit bis in die kleinsten Teile durchsichtig ist. Mit den Beanspruchungen ist gleichzeitig die Sorgfalt für die Dauerhaftigkeit der Isoliermaterialien gestiegen und es ist die Forderung aufgestellt, dass die Leiter im Eisenkörper in unverbrennlichen Fassungen gelagert seien. Die Spannungen der

Digitized by Google

Generatoren sind in neuerer Zeit nur in Ausnahme-Fällen (1) höher als 15.000 Volt gewählt worden. Die Vorteile der unbegrenzten Transformierung in ruhenden Transformatoren und die Nachteile höherer Maschinenspannungen haben im Allgemeinen kein Bedürfnis nach höheren Spannungen aufkommen lassen.

Vor allen Dingen zeichnet den modernen Maschinenbau die zielbewusste Pflege der Ventilation aus. Es wird die Wärmeentwicklung in jedem einzelnen Teile in Beziehung zu seiner Wärmeabfuhr nach aussen gebracht und es wird dafür gesorgt, dass alle Wärme erzeugenden Teile der Kühlluft eine hinreichende Oberfläche bieten und dass der Wärmedurchgang durch die Isolierhüllen im Gleichgewicht steht zu der gewünschten Abkühlung. Durch besondere Ventilatoren, Luftschlitze, Leitkanäle und Verschalungen wird die Kühlluft unter genauer Berechnung den Bedarfstellen zugeführt. Das unablässige Verfolgen aller dieser einzelnen längst bekannten Vorteile, die auch heute noch in fortwährender Entwicklung begriffen sind, hat zusammen gewirkt und die Summe vieler kleiner Fortschritte hat schliesslich einen grossen Erfolg in der Ausnutzung des Materials gebracht, er ist nicht an bestimmte Jahre und Erfinder gebunden und wird niemals abgeschlossen sein. Dass seit 10 Jahren Fortschritte haben gemacht werden müssen, ist selbstverständlich und wir dürfen Generatoren nicht schon deshalb modern nennen, weil sie besser ausgenutzt sind als früher.

Erst bei den mit Dampfturbinen gekuppelten schnelllaufenden *Drehstromgeneratoren mit 2 bis 6 Polen* hat sich in den letzten Jahren allgemein eine ganz neue nämlich die *zylindrische Form des rotierenden Feldmagnets* mit auf den Umfang verteilten Spulen eingebürgert, deren erste unbefriedigende Andeutungen sehr weit zurückreichen, die aber erst seit 1901 durch die geniale Konstruktion von Charles Brown gerade für schnelllaufende Magnete mit kleinen Polzahlen vorbildlich geworden ist. Es ist schwer zu beweisen, worin die einzelnen Vorzüge des zylindrischen Magnets liegen, aber die Geschichte lehrt, dass nach und nach die bedeutendsten Konstrukteure diese Form bevorzugen und dass jeder, der sie einmal verwendet hat, erstaunen wird über die Leichtigkeit, mit der sie sich allen

(1) Z. B. Anlage Manojlovak von Ganz & Cie. 5200 Kw. 30.000 V.

Digitized by Google

Leistungen von 100 bis 20.000 Kw. für 25 und 50 Perioden, 2, 4 und 6-polig anpassen lässt. Die Zahl Amperewindungen, die sich auf einen Pol anordnen lassen, beträgt etwa 80.000. Dabei kann selbst bei 2-poligen Magneten mit einer Polteilung von 1,5 Meter ein magnetischer Flux eines Poles bis 150.10^6 bewältigt werden. Diese Daten gelten z. B. für einen Turbogenerator von 10.000 Kw., 25, 1500 Umdrehungen. Der Kern und die Wicklung lassen sich in allen Teilen energisch durchlüften, die Befestigung der Spulen und Zacken lässt sich so regelmässig verteilen, dass für die Ausbalancierung im kalten und warmen Zustande nur verhältnismässig kleinen Fehler entstehen können, die mit kleinen Zusatzgewichten auszugleichen sind.

Vor den Magneten mit ausgeprägten tiefen Polkernen hat der Zylindermagnet den charakteristischen Vorzug, dass die Wicklung nicht allein in der radialen Tiefe sondern auf dem Umfang ausgebreitet werden kann. Ferner bietet der neue Magnet ganz von selbst die vollkommenste Dämpferwicklung aus den metallischen Verschlusskeilen der Wicklungsnuten und den, die Wicklungsenden umfassenden metallischen Pressringen. Dieser Zylindermagnet wird zur Zeit von Brown, Boveri & Cie., A. E. G., Siemens-Schuckert, Maschinenfabrik Oerlikon, Cie. Alsacienne Belfort, Westinghouse Cie., G. E. Cie., verwendet und bildet das bedeutendste Merkmal der Konstruktionsform moderner Wechselstromgeneratoren mit sehr kleinen Polzahlen. Während einige Konstrukteure, z. B. Brown, Boveri & Cie., Oerlikon, Siemens-Schuckert, Westinghouse, die Nuten, welche die Wicklung aufnehmen, in Blechscheiben einstanzen oder in volle Stahlzylinder hineinschneiden, pressen andere Firmen, z. B. die A. E. G. und G. E. C. die zur Befestigung der Spulen dienenden Polzacken zwischen die Spulen in den zylindrischen Kern hinein. Der Zylindermagnet ist auch bei den Konstrukteuren, die ihn heute ausschliesslich verwenden, erst nach einer Reihe von Abenteuern mit anderen Systemen siegreich durchgedrungen, eine Zeit hindurch schienen der Typus mit rotierender Armatur, auch der Induktor-Typus, sodann einige höchst schwierige Konstruktionen mit ausgeprägten Polkernen wenigstens für kleinere Leistungen und Geschwindigkeiten gewisse Aussicht auf Erfolg zu haben. Heute erinnern wir uns alle mit Schmerzen der Opfer an Energie und Geld für diese verschollenen Kunststücke, die niemals für die modernen Leistungen und Geschwindigkeiten genügt hätten.

Digitized by Google

Bei 2 Polen ist der Cylindermagnet dem Magnet mit ausgeprägten Polen auch bei kleinen Leistungen von 100 KW. an überlegen, bei 4, 6 u. 8 Polen kann für kleinere Leistungen die letztere Form einfacher u. billiger werden. Wenn aber die Leistung eines Poles 1000 — 2000 KW. erreicht, so gewinnt der Cylindermagnet unbedingt den Vorsprung.

Bei den *modernen Gleichstromgeneratoren*, deren Leistung und Geschwindigkeit in dem letzten Jahrzehnt ebenfalls eine ungeahnte Steigerung erfahren haben, ist das Hauptmerkmal die allgemeine Benutzung von Wendefeldern, die durch Kompensationswicklungen und Wendepole bewirkt wird. Es ist oben erwähnt worden, dass schon Menges 1884 diese Hülfsmittel beschrieben hat, an der Ausstellung Paris 1900 war aber keine einzige Gleichstrommaschine mit Hilfspolen oder Kompensationswicklung zu sehen. Erst das Bedürfnis, für die an Geschwindigkeit und Leistung rasch wachsenden Antriebsmotoren, sowohl für Drehstrommotoren als auch Wasserturbinen und Dampfturbinen, geeignete Gleichstromgeneratoren zu schaffen, hat die Konstrukteure dazu gezwungen, das alte Hilfsmittel, nach welchem so lange kein Bedarf mehr aufgetreten war, wieder aufs neue zu erfinden. Mit der Kompensation des Armaturfeldes gelingt es ohne Rücksicht auf die Form und Stärke des Hauptfeldes mit 10.000 Amperewindungen auf einem Pol der Armatur eine zuverlässige Kommutierung bei einer mittleren Lamellenspannung von 16 Volt zu erreichen. In der obenstehenden Tabelle sind Generatoren aufgeführt, welche bei einer mittleren Lamellenspannung von 16 Volt in jeder Spule 400 Amperewindungen mit einer mittleren Leistung von 6400 Watt kommutieren. Die Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit der Gleichstromgeneratoren ist allerdings bei weitem nicht so schnell und hoch gestiegen, wie diejenige der Drehstromgeneratoren. Denn wenn auch durch die Ausbildung der Kompensationswicklungen der Einfluss der Armaturamperewindungen auf die unter den Bürsten herrschende Lamellenspannung zum grossen Teil aufgehoben werden kann, so sind doch eine Reihe Oscillationen und Verzerrungen in den Feldern der Wendezone z. B. infolge der Diskontinuität der Nuten- und Lamellenteilung und der unvermeidlichen Unsymmetrien und Schwankungen der Hauptpolfelder und der parallelgeschalteten Armaturstromkreise geblieben welche die Lamellenspannung individuell von Maschine zu Maschine so verwickeln, dass die zahllosen Theorien und wis-

Digitized by Google

senschaftlichen Experimente dem Praktiker im konkreten Falle keine Hülfe bieten können. Dazu kommen aber noch die engen Grenzen, an welche die Kunst der Stromabnahme von den Kollektoren gebunden ist. Trotz der unaufhörlichen Variationen harter und weicher Kohlen und Graphitsorten, trotz sorgfältigster Behandlung der Kollektoroberfläche und peinlichster Anpassung der Kohlenhalter an die notwendigen Ungenauigkeiten und Abnutzungen, konnte an den zulässigen Werten der Stromdichte und der Reibungsgeschwindigkeit an der Kontaktfläche in den letzten Jahren keine Wandlung durchgreifen und der Spannungsverlust hat sich kaum verändert. Die Auslese bestimmter Kohlensorten für gewisse Bedingungen führt in einzelnen Fällen zu Erfolgen, versagt aber im Allgemeinen zu oft, um als ein gründliches Heilmittel gelten zu können. Eine grosse Schwierigkeit bietet der dauerhafte Ausgleich der Belastung der parallel arbeitenden Stromkreise und Stromabnehmer, sowohl der einzelnen Kohlen, als auch der gleichpoligen Bürstenstifte. Die Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit der Gleichstrommaschine erscheint daher heute immer noch durch die Umfangsgeschwindigkeit und Oberfläche des Kollektors beschränkt, auch wenn es gelingen würde, die Schwierigkeiten der Kommutation vollständig zu beseitigen. Um daher die Vorteile sehr grosser Einheiten schnellaufender Antriebsmotoren z. B. Dampfturbinen Induktionsmotoren in Umformergruppen auszunutzen, werden mehrere kleinere Einheiten von Gleichstromgeneratoren zusammengekuppelt, oder der Konstrukteur verwendet Mittel zur Geschwindigkeitsübersetzung.

Der Bau von Zahngetrieben für grosse Leistungen und Geschwindigkeiten hat in letzter Zeit so wesentliche Fortschritte gemacht, dass die allgemeine Verbreitung von Generatoren mit Zahngetrieben zu erwarten steht. Diese Konstruktion hat den grossen Vorzug, dass die günstigsten Geschwindigkeiten des Antriebsmotors und Generators ganz unabhängig von einander nur nach Rücksicht der eigenen Oekonomie ausgelesen werden können. Der totale Wirkungsgrad der Antriebsmotoren, Zahngetriebe und Generatoren wird dabei höher sein können als der Wirkungsgrad von Generatoren und Antriebsmotoren mit Geschwindigkeiten, die für beide Teile aus einem Kompromiss mit gewissen Opfern an Oekonomie und Betriebssicherheit belastet worden sind.

Digitized by Google

d) Dimensionierung moderner Drehstromgeneratoren.

Da das wesentliche Merkmal der modernen Generatoren die ausserordentliche Belastung des einzelnen Poles ist, so beschränken wir uns im Folgenden darauf, die ungefähren Grenzwerte der Dimensionen für die beiden normalen Umdrehungszahlen 3000 und 1500 anzugeben, und die charakteristischen Eigenschaften eines 2-poligen Generators für 50 Perioden mit einer Leistung von 5000 Kw. und eines 4-poligen Generators für 50 Perioden mit einer Leistung von 12.500 Kw. zu skizzieren.

1. — Mechanische Eigenschaften.

Wellenzapfen. Die Zapfengeschwindigkeit darf 25 m. der spezifische Druck bezogen auf die Fläche F des Achsialschnittes 5 kg/cm² betragen. Der Verlust in Watt ist bei diesen Belastungen ungefähr gleich $12 \times F$, bei einem hypothetischen Reibungskoeffizienten 0,010. Zur Schmierung und Kühlung wird Oel in die Lagerschalen gepresst, das in besonderen Kühlräumen gekühlt wird. Für 30° Temperaturzunahme des Oeles bedarf es zur Fortführung der Wärme in der Minute etwa 1,5 Liter Oel für 1000 Watt Verlust.

Die Luftreibung der zylindrischen Oberfläche des Rotors Bewirkt bei etwa 100 m. Umfangsgeschwindigkeit einen Verlust von etwa 0,5 Watt auf 1 cm² Fläche. Die Oberfläche ist dabei durch etwa 5 m/m Vertiefungen an den Nutenkeilen gebrochen.

Wellendimensionen. Kritische Geschwindigkeiten. — Die Kunst des Ausbalancierens ist wiederholt beschrieben worden. Es muss jede Vibration bei der normalen Geschwindigkeit vermieden werden und es ist kein Aufwand von Mühe und Sorgfalt zu scheuen, um die Rotoren bei voller Geschwindigkeit in kaltem und warmem Zustande unerregt und erregt dauernd vollkommen vibrationsfrei zu gestalten. Diese Bedingung kann nur erfüllt werden, wenn den einzelnen Teilen eine unverrückbare Lage gegeben ist und die Wellendurchbiegung keine kritischen Werte annimmt. Bei den neueren Konstruktionen, bei denen der

Digitized by Google

ganze Rotorkörper aus einem einzigen Stahlcylinder, also aus einer genuteten mit Wicklung ausgefütterten Welle besteht, gelingt es für alle Grössen, die kritische Geschwindigkeit mehr als 25 % höher als die normale Geschwindigkeit zu halten. Die Durchbiegung der Welle unter dem Einfluss des Rotorgewichtes ist nach bekannten Methoden graphisch zu bestimmen. Als Annäherungen können folgende Formeln benutzt werden:

Kritische Umdrehungszahl $P_k = 300\sqrt{\frac{I}{f}}$, f Durchbiegung in cm., P Rotorgewicht, d_1 maximaler Wellendurchmesser auf dem mittleren zylindrischen Teil, L_2 totale Länge der Welle zwischen den Lagermitten.

Es ist dann im Allgemeinen

$$f = \frac{P \cdot l^3}{d^4 \cdot 10^7} \cdot$$

Mechanische Festigkeit. Die mechanische Festigkeit der Materialien ist so zu beanspruchen, dass bei einer Geschwindigkeitserhöhung von 40 % die Proportionalitätsgrenze nicht überschritten wird. Die grössten Beanspruchungen treten in Allgemeinen auf in den Rotorzacken und Keilen, welche die Spulen in den Nuten festhalten und in den Bandagen oder Pressringen, welche die Spulenbogen an den Stirnseiten umschliessen. Als Proportionalitätsgrenze darf gelten für:

0,5 m/m Blech	1.000	Kg.
Stahlblech c. 1 m/m dick	3.000	„
Geschmiedeter Stahl (Siemens Martin Stahl)	3.500	„
Deltametall	2.500	„
Bandagen-Stahldraht	10.000	„
Bronce für Keile	1.500	„
Kupfer für Keile	1.000	„
Nickelstahl	4.500	„

Alle Gussformen sind zu vermeiden, da ihre Unhomogenität nicht geprüft werden kann. Es sind Materialien grösster Dehnbarkeit zu bevorzugen, welche bei lokalen Ueberanstrengungen die Last verteilen und einem Bruch ausweichen können, oder auch vor dem Bruch durch ihre Ausdehnung die Maschine stillsetzen.

Luftkühlung (*Ventilation*). Die Abkühlung durch Ausstrahlung und Wärmeleitung der Maschinenaussenfläche durch die ruhende

Digitized by Google

Luft verschwindet in allgemeinen neben der in der Maschine erzeugten Wärmemenge, welche entfernt werden muss. Es ist daher unbedingt für reichliche Zufuhr und Abfuhr von Kühlluft zu sorgen. Soll die Temperaturzunahme der Kühlluft auf 20° Celsius gehalten werden, so ist für ein Kw. Energieverlust, das durch die Kühlluft wegzutragen ist, theoretisch eine Luft menge von 3 kg. in der Minute erforderlich. Für praktische Berechnung ist etwa das Doppelte einzusetzen. Der Luftdruck, der bei den üblichen grösseren Generator-Konstruktionen erforderlich ist, um diese Kühlluft mit etwa 15 m. Geschwindigkeit durch die Luftkanäle zu treiben, steigt bis etwa 150 m/m Wassersäule. Es würde daher theoretisch für jedes Kw. Generatorverlust ein Ventilatoraufwand von 50 Watt entsprechen. Wenn die Luftmenge praktisch reichlich bemessen wird und der Wirkungsgrad der Ventilatoren mit 30 % eingeschätzt wird, so ergeben sich etwa 300 Watt. Dieser Energiebedarf ist also durchaus kein zu vernachlässigender Wert und es muss der Konstrukteur die Luftwiderstände und den Wirkungsgrad der Ventilatoren wohl berücksichtigen.

Die Leitkanäle für die einströmende und ausströmende Luft sind nach den bekannten Regeln des Ventilatorbaues anzuordnen. Die Weite der Luftkanäle, durch welche die Kühlluft durch den Eisenkörper und die Spulen strömt, soll etwa so bemessen werden, dass die Luftgeschwindigkeit nicht über 15 m. steigt. Bei 15 m. Luftgeschwindigkeit erfordert ein 1 m. langer 200 m/m breiter Luftschlitz mit 10 m/m Weite etwa 100 m/m Anfangsdruck, der gleiche Schlitz mit 20 m/m Weite 40 m/m, und mit 30 m/m Weite 30 m/m Druck.

Als Wärmequellen, welche durch die Kühlluft abzukühlen sind, kommen die Wicklungen und die Armaturbleche in Betracht. Die Abkühlungsverhältnisse sollen hier ausführlicher dargestellt werden, da die Kunst der zweckmässigen Abkühlung in den schnellaufenden Generatoren eine besondere Wichtigkeit besitzt. Bei 15 m. Luftgeschwindigkeit und einer Temperaturerhöhung von 30° des wärmeerzeugenden Körpers über der Kühllufttemperatur kann mit einer Wärmeabgabe von 0,25 Watt pro 1 cm² Oberfläche gerechnet werden.

Der Wärmedurchgang durch die Isoliermaterialien der Wicklungen und der Blechtafeln darf kein zu grosses Wärmegefälle zwischen der abkühlenden Aussenfläche und der im Innern befindlichen Körper bewirken. Als Mittelwert für die üblichen

Digitized by Google

Isoliermaterialien von Wicklungen darf bei 3 m/m Dicke ein Wärmegefälle von 50° Celsius ben einem Durchgang von 0,25 Watt pro 1 cm² gesetzt werden. Die Wärmeleitung eines in einer Röhre von 2 l cm. Länge vollkommen isolierten Kupferstabes, der einzig an seinen beiden Enden eine Abkühlung erleidet, ergibt ein Wärmegefälle zwischen seiner Mitte und den Enden von

$$t_1 - t_2 = \frac{l^2 i_0^2}{380}$$

i_0 ist die Kupferbeanspruchung pro 1 m/m² Querschnitt.

Für ein Blechpacket von 2 L_1 cm. Dicke, das nur quer zu seiner Schichtung von seiner Mitte aus nach beiden Seiten Wärme ableitet und in der Raumeinheit von 1 cm³ einen Wattverlust von 0,03 Watt entsprechend 4 Watt pro Kg. erleidet, ergibt sich ein Temperaturgefälle von $t_1 - t_2 = 1{,}5\, l^2$ und in Richtung der Schichtung $t_1 - t_2 = 0{,}025\, l^2$. Der Wärmedurchgang von 0,012 Watt durch ein Paket aus isoliertem Blech quer zur Schichtung erzeugt auf einer Strecke von 1 cm. ein Wärmegefälle von 1°, in Richtung der Schichtung tritt das gleiche Gefälle bei 0,72 Watt ein. Wenn die abkühlende Oberfläche die Temperatur t_1 über der Kühlluft besitzt und hier eine Abkühlung von w_1 Watt pro 1 cm² und 1° stattfindet, so wird die Temperatur t_2 im Innern mit einem innern Wärmedurchgang bei 1° Differenz von w_2 Watt steigen auf

$$\frac{t_2}{t_1} = 1 + \frac{w_1}{w_2}.$$

Ein ringförmiges Blechpaket des Statorkörpers mit der achsialen Breite von b cm. und der radialen Höhe von h cm., das ringsherum von Kühlluft gleicher Temperatur und Geschwindigkeit umspült wird, und dessen Energieverluste gleichmässig verteilt sind, wird an den zylindrischen Aussenflächen eine höhere mittlere Temperatur annehmen als an den ebenen Seitenflächen, weil von der Mitte nach den Seiten quer zu der Schichtung jenach der Blechbreite b ein viel stärkeres Wärmegefälle eintreten muss als von der Mitte nach den zylindrischen Oberflächen (1). Die Breite der Blechpakete beträgt etwa $^1/_4$ ihrer Höhe.

---

(1) Vgl. OSSANNA, *Z. f. E. u. M.*, 1909, S. 489.

Digitized by Google

Sie wird in der Regel kleiner als 8 cm. gewählt.

Bezogen auf die Innentemperatur der Blechpakete, und mit Berücksichtigung des Wegfalls der Ausstrahlung, wird daher die abkühlende Wirkung der seitlichen Wände nur mit der Hälfte des maximalen Temperaturgefälles zu bewerten sein.

Es ist nun Aufgabe des Konstrukteurs, auf Grund dieser Abkühlungsgesetze die Energieverluste in den Wicklungen und Blechen im Zusammenhang mit der verfügbaren Oberfläche zu bringen, oder auch für gegebene Grenzwerte der Energieverluste für eine genügende Oberfläche zu sorgen, so dass die als zulässig erkannten Temperaturgrenzen nicht überschritten werden.

Die Sättigung des Statoreisens wird bis zu den Grenzen der Permeabilität gesteigert, bei welcher die Bildung von beträchtlichen Streufeldern & Wirbelstromverlusten im Gehäuse zu vermeiden ist. Es darf etwa mit einer Induktion von 12.000 Linien in dem ungenuteten Ring und 18.000 in den Zähnen gerechnet werden, dabei betragen die theoretischen Eisenverluste bei einer Blechqualität von 2 Watt (10.000) 50 im Ring mit zusätzlichen Verlusten etwa 4 Watt, in den Zacken mit zusätzlichen Verlusten etwa 10 Watt. Ein Blechring von 30 cm. radialer Höhe und 8 cm. achsialer Tiefe, bei dem nur die äussere Zylinderfläche und nur eine Seitenfläche zur Abkühlung mitgerechnet werden, ergibt für 1 cm. Kreisumfang eine Oberfläche von 38 cm², bei einer zulässigen Temperaturerhöhung von 30° kann ein Energieverlust von etwa 10 Watt abgeleitet werden. Das Gewicht des Ringabschnittes beträgt 1,7 kg., es darf also eine Beanspruchung mit 6 Watt pro kg. durchschnittlich gewagt werden; bei einem Paket von gleicher Höhe und halber Breite ergibt sich eine Oberfläche von 34 cm² und ein zulässiger Energieverlust von 10 Watt pro kg. Es liesse sich also auch mit Blech geringerer Qualität mit schmaleren Blechpaketen eine genügende Abkühlung herstellen mit den durch die Permeabilität gebotenen Beanspruchungen.

In den Nuten sind die Leiter in der Regel mit 3-5 m/m starken Mikanithüllen umgeben. Eine Nutenfüllung mit 1600 Ampereleitern kann als ein normaler Mittelwert betrachtet werden, bei der Kupfersättigung i_0 ist der Kupferquerschnitt $q = \frac{1600}{i_0}$ m/m² und der Verlust pro 1 cm. Länge: $0{,}32 \cdot i_0$ Watt, die mittlere Oberfläche der Leiter wird etwa $0{,}7\sqrt{q}$ cm² umfassen, so dass

Digitized by Google

eine Beanspruchung der Oberfläche mit $\frac{i_0\sqrt{i_0}}{80}$ Watt/cm² eintritt. Wird für die in den Nuten ausgestreckten Leiter nur die in den Luftschlitzen und an den Seiten frei bleibende Länge, die etwa $^1/_5$ der totalen Länge beträgt, zur Abkühlung mitgerechnet, so kann für 30° Temperaturerhöhung der Aussenfläche gerechnet werden mit

$$i_0\sqrt{i_0} = 4,$$

daraus ergibt sich $i_0 = 2{,}5$. Bei einer Mikanithülle von 3 m m Dicke würde die Innentemperatur des Leiters dabei auf

$$t_2 = 30\left(1 + \frac{0{,}008}{0{,}005}\right) = 78°$$

steigen.

Da an den Stirnseiten die Wicklungsbogen in der Regel mit dünneren Isolierhüllen umgeben sind und der Kühlluft etwa die doppelte Abkühlfläche bieten, wie in den Nuten, so wird ein Wärmegefälle von den Leiterstücken in den Mikanitrohren nach den freieren Spulenbogen stattfinden. Wird vorausgesetzt, dass die Wärmeableitung in den Nuten vollständig versage, weil z. B. das Zahneisen selbst ebenso viel Wärme den Leitern zuführt, als diese abgeben können, dann tritt bei einer Eisenlänge von 1 Meter ein Wärmegefälle von der Mitte bis an die Enden auf, das für die gewählten Sättigungen

$$t_i - t_2 = \frac{50^2 \cdot 2{,}5^2}{380} = 40°$$ betragen würde.

Die Spulenbogen haben dann auf ihrer ganzen Länge die von den Nuten her übernommene Wärmemenge ausser ihrer eigenen Verluste abzuführen, sie werden also etwa zwei Mal mehr belastet, als wenn sie sich für sich allein abzukühlen haben.

In den *rotierenden Feldmagneten* ist der hauptsächlichste Energieverlust auf die Erregerwicklung beschränkt. Die zusätzlichen Eisenverluste und die Verluste in den Dämpferwicklungen sollen nicht berücksichtigt werden. Der Eisenkörper selbst, in den die Spulen eingebettet sind, soll als sehr guter Wärmeleiter ohne eigene Verluste behandelt werden. Die Erregung besteht aus A. L. Ampereleitern, die in Nuten gleichmässig verteilt sind und mit verhältnismässig dünnen Isolierhüllen von etwa 1 m/m Dicke umgeben sind. In einer Nute werden etwa 10.000 A. L. und auf einer Polteilung etwa 100.000 Amp.-Leiter unterge-

Digitized by Google

bracht. Bei einer Kupferbeanspruchung von i_0 Amp./mm² ergibt sich in einer Nute ein Energieverlust pro 1 cm. Länge von $2\,i_0$ Watt, auf einer Polteilung $20\,i_0$ Watt. Zerlegt man die Spulen in die geraden Stücke, welche in den Nuten liegen und in die Spulenbogen, die an den Stirnseiten in besonderen Bandagen oder Büchsen eingeschlossen werden, so kann der erste Teil seine Wärme nach allen Seiten direkt an den Eisenkörper abgeben, der andere Teil kann Wärme nur an der Aussenseite an die Umhüllung ableiten, oder durch innere Wärmeleitung an der geraden Teil abgeben. Die Länge der geraden Stücke beträgt bei 100 cm. Eisenbreite ungefähr $^2/_3$ der ganzen Windungslänge und es soll der Einfachheit und Sicherheit halber angenommen werden, dass der ganze Wärmeverlust der Bogen den Leitern in den Nuten überbürdet werde.

Die Polteilung beträgt bei 50 Perioden und 100 m. Umfangsgeschwindigkeit 1 m., die zylindrische Oberfläche von 1 cm. Länge also 100 cm². Der Wärmeverlust $1{,}5 \cdot 20 \cdot i_0$ für 30° Temperaturerhöhung dürfte demnach $i_0 = \frac{0{,}25 \cdot 100}{1{,}5 \cdot 20} = 0{,}8$ betragen. Mit diesen Sättigungen liesse sich aber der nötige Kupferquerschnitt nicht anordnen. Es ist nun Aufgabe des Konstrukteurs, neben der zylindrischen Aussenfläche durch Luftkanäle in achsialer und radialer Richtung die wirksame Oberfläche zu vergrössern. Es gelingt, die Bogen allein zu ventilieren und durch achsiale Kanäle und radiale Luftschlitze Luft einzusaugen, dadurch werden ohne grosse Schwierigkeiten Kupferbeanspruchungen bis 3 Amp. zulässig gemacht.

In einer Nute besitzt eine Spule aus 10.000 Amp.-Leitern mit einer Sättigung von $i_0 = 3$ eine Oberfläche pro 1 cm. Länge von etwa 30 cm., also einen Wattverlust von 0,2 bis 0,3 Watt pro 1 cm². Dabei tritt in einer Isolierhülle von 1 m/m Dicke ein Wärmegefälle von 15-20° über der Aussentemperatur der Nutenwand ein.

Die neuen Konstruktionen besitzen in der Regel auf beiden Seiten des Rotors Ventilatoren, welche in grosse Luftkammern an den beiden Stirnseiten des Stators die Druckluft fördern, von dort wird die Luft durch den Zwischenraum zwischen Stator und Rotor oder von aussen in die radialen Luftschlitze des Stators getrieben. Der Rotor erhält im allgemeinen eine getrennte selbständige Ventilation; von beiden Seiten wird Luft achsial eingesogen und in den Luftspalt zwischen Stator und

Digitized by Google

Rotor ausgeströmt, von wo sie durch die radialen Luftschlitze des Stators mit der Pressluft der Hauptventilation entweicht. Sehr beachtenswerte Konstruktionen haben die Siemens-Schuckert Werke eingeführt, indem sie in Stator und Rotor durch achsiale in den Nuten neben den Spulen frei bleibende Kanäle die Kühlluft treiben und auch die Statorbleche nicht durch radiale Luftschlitze sondern durch achsiale röhrenförmige Kanäle kühlen.

2. — **Elektrische Eigenschaften.**

A. Drehstromgeneratoren.

Die allgemeine Dimensionierungsformel für elektrische Generatoren, welche den Zusammenhang zwischen der Polzahl P, dem magnetischen Feld F eines Poles, der Umfangsgeschwindigkeit U in cm., der Zahl induzierter Ampereleiter auf 1 cm. Umfang JL_0 darstellt, lautet bekanntlich:

1) $A \cdot 10^{11} = P \cdot F \cdot JL_0 \cdot U \cdot K$, wobei die Konstante K in der Regel angenähert 1,1 ist.

Die Zahl totaler Ampereleiter, die auf den Umfang fallen sei JL und die Periodenzahl n, dann ist auch:

2) $A \cdot 10^{11} = 2\ n \cdot F \cdot JL \cdot K$.

Es ist aus diesen Formeln ohne weiteres ersichtlich, dass die Leistungsfähigkeit bei gegebener Polzahl und Periodenzahl nur durch Erhöhung des magnetischen Feldes, der totalen Zahl Ampereleiter, oder der Umfangsgeschwindigkeit erreicht werden kann.

Die Konstruktion erleidet nun eine erste wichtigste Grenze durch die Umfangsgeschwindigkeit u, die einerseits durch die Verluste der Luftreibung und anderseits durch die mechanische Festigkeit des Materials gebunden ist.

Die Beanspruchung der Rotorzacken und der Bandagen, welche die Spulen halten, erreichen bei 150 m. Umfangsgeschwindigkeit an der Zylinderoberfläche die zulässigen Grenzwerte und es wird daher bei normalen Umdrehungszahlen die Geschwindigkeit von 110 m. kaum überschritten werden können. Die Zahl der induzierten Ampereleiter, welche auf den Umfang der Statorbohrung anzuordnen sind, bedingt auf den Rotorumfang

Digitized by Google

eine mindestens doppelt so grosse Leiterzahl. Es wurde schon oben erwähnt, dass auf einer Polteilung von 100 cm. maximal 100.000 A.-L. in etwa 10 Nuten untergebracht werden können. Die Nuten erhalten dabei Dimension von etwa 40×150 m/m. Als Grenzwert für JL_0 in Formel 1) darf mit 400 gerechnet werden, also pro Pol mit 40.000 induzierter A.-L., oder pro Pol und Phase bei einer Dreiphasenwicklung mit etwa 13.000 A.-L. Das magnetische Feld F ist einerseits durch die Polteilung und anderseits durch die Eisenbreite begrenzt. Wenn angenommen wird, dass etwa $^2/_3$ des magnetischen Fluxes sich auf $^1/_2$ Polteilung verteilen und eine Luftsättigung von $B = 10.000$ zulässig ist, so ergibt sich bei Umfangsgeschwindigkeit von 110 m. mit Berücksichtigung der Luftschlitze eine Eisenbreite von ungefähr

$$b = \frac{2\,F}{10^6}.$$

Die Eisenbreite ist mit Rücksicht auf die kritische Tourenzahl möglichst zu beschränken, bei 2-poligen Rotoren mit 3000 Umdrehungen und 750 m/m Durchmesser wird das Rotorgewicht bei einer Eisenbreite von 120 cm. ungefähr 5000 Kg., die Lagerdistanz etwa 3 m., die kritische Geschwindigkeit für einen aus einem einzigen Stahl-Zylinder mit der Welle herausgearbeiteten Magnet ergibt sich zu etwa 4000 Umdrehungen. Mit der Eisenbreite wächst aber auch die Schwierigkeit einer gleichmässigen Durchluftung. Wenn wir als Grenzwert für 3000 Umdrehungen $b = 120$ cm. und für 1500 Umdrehungen $b = 200$ setzen, so erhalten wir als max. Werte für $F = 60 \cdot 10^6$ bezw. $100 \cdot 10^6$ und für die Leistungen nach Formel 1)

$$\begin{aligned} A &= 5.700 \text{ Kva. für } 3000 \text{ Umdrehungen} \\ &19.000 \quad \text{„} \quad \text{„} \quad 1500 \quad \text{„} \end{aligned}$$

Die höchsten ausgeführten Leistungen betragen 4400 bezw. 12.500 Kva.

Die Höhe des Statorbleches über der Nut beträgt nach den früheren für $B = 12.000$ etwa 25 cm., die Breite eines Pakets 8 cm. und die Weite der Luftschlitze etwa 15 m/m. Die Zahl und Weite der Schlitze richten sich nach der Materialökonomie und den Ventilationsverlusten. Die Herstellungskosten eines Luftschlitzes sind ungefähr gleich dem Wert des mit Blech ausgefüllten Schlitzes. Die Nutengrösse ist beschränkt einerseits durch die Werte der Oeffnung, mit welcher die zusätzlichen

Digitized by Google

Verluste durch magnetische Schwingungen und Wirbelverluste durch die ins Innere der Nuten dringenden Wechselfelder zusammenhängen und anderseits durch die Nutenhöhe, mit welcher der Aufwand an Statoreisen und Zahnverlusten wächst. Es wird nicht vorteilhaft sein, Nuten mit einem grösseren Querschnitt als etwa 25×70 m/m auszuführen. In einer solchen Nut lassen sich bequem etwa 600 m m² Kupfer unterbringen, die etwa 1500 Ampereleiter bilden können. Wenn die mittlere Temperatur der Kühlluft etwa 40° beträgt, so muss nach den früheren mit einer Temperatur des Kupfers von etwa 100° gerechnet werden. Es ist daher notwendig, dass die Isolation wärmebeständig ist. Die M. F. Oerlikon verwendet deshalb z. B. nur Mikanit und Asbest-Isolierung. Um die bekannten durch die Hochspannung eingeleiteten Zersetzungen der Luft und die auf chemischem Wege vor sich gehende Zerstörung der Isolation und des Kupfers zu verhindern, ist es notwendig, zwischen den Leitern und den Wänden der Mikanitröhren jeden Luftspalt zu vermeiden und die Spule wie ein vollkommenes Kabel in die Isoliermasse einzubetten.

Die ungeteilten Querschnitte der Leiter sollen nicht mehr als etwa 200 m m² betragen, um zusätzliche Verluste durch die Wechselfelder zu vermeiden. Die Spulenbogen an den Stirnseiten sind sorgfältig gegen einander und gegen der Statorkörper abzustützen, da bei ihrer grossen Länge und grossen Amperewindungszahl insbesondere bei plötzlichen Kurzschlüssen gefährliche Biegungsbeanspruchungen auftreten. Diese Beanspruchungen lassen sich nach folgenden Regeln abschätzen und darnach die mechanischen Abstützungen konstruieren.

Diejenige Kurzschlussstromstärke J_k, welche in die Statorwicklung bei stillstehendem kurzgeschlossenen Rotor bei der normalen Klemmenspannung und Periodenzahl eintritt, ist im Allgemeinen etwa 7 Mal grösser als die normale Stromstärke J. Bei plötzlichem Kurzschluss des unter voller Spannung und Geschwindigkeit arbeitenden Generators tritt die Stromstärke J_k während einiger Perioden mit einseitigen Amplituden auf, so dass der absolute Amplitudenwert den Betrag von $2{,}8\ J_k$ also c. $20 \times J$ erreichen kann.

Die Kraft, welche solche Stromwerte zwischen parallel verlaufenden Spulen und zwischen Spulen und benachbarten Eisenkörpern auf einer Spulenlänge von 1 cm. erzeugen, beträgt etwa

$$P = \frac{2 \cdot Z^2 \cdot l}{a \cdot 10^8} \text{ Kg.} \times (20\,J)^2$$

Digitized by Google

wobei Z die Leiterzahl einer Spule, a der mittlere Abstand bedeutet. Setzen wir nach dem früheren bei gewöhnlicher Spulenwicklung für das Spulenbündel einer Phase $Z \cdot J = 13.000$, und den Abstand $a = 5$ cm., so erhält man $P = 300 \cdot l$ Kg. Diese Kraft erzeugt ein Biegungsmoment und eine Durchbiegung von

$$f = \frac{5 \cdot P \cdot l^3}{E \cdot J \cdot 384}$$

wobei E der Elektrizitätsmodul von Kupfer = 800.000 und J das Trägheitsmoment der Spule bedeutet.

Das Trägheitsmoment eines fest zusammen gebundenen Spulenbündels sei angenähert gleich der Summe der Trägheitsmomente von 24 einzelnen Spulen von denen jede einen quadratischen Kupferquerschnitt von 15 m/m Seitenlänge besitze, also J = 10, dann ergibt sich

$$f = \frac{5\, l^4}{10^7}.$$

Bedenkt man nun, das die kleinste Durchbiegung die vollkommen starren Isolierkörper beschädigt und zerbrechen kann, so sieht man leicht, wie jeder Spulenbogen in sich selbst zu versteifen und auf etwa 20 cm. Länge vollständig fest abgestützt werden muss.

Es ist selbstverständlich von Fall zu Fall die Kurzschlussstromstärke und die Beanspruchung der Spulenbogen nachzu rechnen. Je nach der Wicklungsanordnung können die Kräfte bedeutend verkleinert werden, wenn z. B. nicht alle Windungen einer Phase in einem Bündel zusammengefasst werden.

Der rotierende zylinderische Feldmagnet ist aus dem Vorhergehenden im Allgemeinen charakterisiert. Die Verteilung der Amperewindungen in einzelne Nuten ist durch das Fassungsvermögen der Nuten begrenzt. Die einzelne Spule darf nicht zu schwer werden und die Nutenöffnung nicht zu weit, da die Festigkeit der Zacken und Keile, welche die Spule halten, sehr rasch mit zunehmenden Spulendimensionen beeinträchtigt wird.

Die Wicklung eines Poles wird in 6 bis 10 Nuten verteilt. Zwischen den bewickelten Nuten besteht ein unbewickeltes Polhorn, das etwa ein Drittel der Polteilung umfasst. Bei einem wesentlich schmaleren Polhorn wird die Wirksamkeit der aufgewendeten Amperewindungen vermindert.

Gemäss der ungeheuren Zahl der Amperewindungen ist die

Digitized by Google

Luftdistanz zwischen Stator und Rotor gross zu wählen. Die Armaturrückwirkung bei induktiver Vollast mit cos = 0,8 soll nicht mehr als 40 % der totalen Amperewindungen des Magnets aufheben, so dass für die normalen Sättigungen eine Erregung von ungefähr 60 % der totalen Amperewindungen übrig bleiben. Bei den Sättigungen ist ein Spannungsverlust infolge des Streufeldes der Armaturwicklungen bis etwa 15 % zu berücksichtigen. Der genaue Wert dieser Streuverluste kann in bekannter Weise ermittelt werden. Rechnen wir hierfür mit 30.000 Amperewindungen pro Pol und davon etwa $^1/_5$ für die magnetischen Widerstände der Eisenkörper, so ergibt sich ein Luftspalt von etwa 3 cm. Die Streuung der zylindrischen Magnete ist infolge der grossen Polteilung verhältnismässig klein und beträgt etwa 20 %. Die Befestigung der Spulen in den Rotornuten geschieht mittels Metallkeilen, deren Festigkeit genau zu prüfen ist. Diese Keile werden auf den Stirnseiten mit den Bandagen oder Pressringen gut leitend verbunden und bilden auf diese Art eine vollkommene Käfigkurzschlusswicklung, durch welche alle Feldfluktuationen bei Einphasenstrombelastung, oder Unsymmetrien der Mehrphasenbelastung kompensiert werden können. Durch sorgfältige Dimensionierung lässt sich erreichen, dass die bei stationären Kurzschluss der Statorwicklung mit normaler Stromstärke auftretenden zusätzlichen Verluste bei symmetrischen Mehrphasenstrom etwa 75 % der rechnerischen Widerstandsverluste betragen, bei Einphasenstrom etwa 150 %.

Die charakteristik hat im allgemeinen einen solchen Verlauf, dass eine Spannungserhöhung von etwa 30 % zwischen induktiver Vollbelastung und Leerlauf eintritt.

Der Wirkungsgrad der modernen Turbogeneratoren ist infolge der beträchtlichen Reibungs- und Ventilationsverluste im allgemeinen kleiner als der Wirkungsgrad gleich grosser Generatoren mittlerer Umdrehungszahl.

Beispiele. — Als Beispiele sollen 2 listenmässig durchkonstruierte Generatoren der Maschinenfabrik Oerlikon dienen.

Bei einem 2-poligen Generator mit 3000 Umdrehungen, 4000 Kw betragen die einzelnen gerechneten Verluste umgefähr:

Digitized by Google

Lagerreibung . . .	10	Kw.
Ventilation . . .	45	„
Eisenverluste . . .	30	„
Zusätzliche Eisenverluste	15	„
Kupferverluste Stator .	10	„
Zusätzliche Verluste .	8	„
Rotorkupfer . . .	16	„
	134	Kw. = 4,3 %.

Der Generator hat folgende Dimensionen:

Aeusserer Blechdurchmesser	1500	
Bohrung	720	
Totale Eisenbreite	1000	mit 10 Luftschlitzen von 15-20 m/m Weite
Flux	$56 . 10^6$	
Stator 60 Nuten 17×65 für 10.000 Volt; pro Nut: 5 Leiter		
Rotor 16 Nuten		pro Nut: 44 Leiter
Amp. Wdgn. p. Pol: 34.000		
Polhornbogen	360	
Luftdistanz	25	
Lagerdistanz zw. Lagermitten	3000	

Der Generator besteht aus 7500 Kg. Statorblech, 6000 Kg. Statorgehäuseguss, 770 Kg. Statorkupfer, 650 Kg. Rotorkupfer, 3700 Kg. Rotoreisen, 1700 Kg. Lagergusseisen, 3700 Kg. Grundplattenguss.

Ein 4-poliger Generator mit 1500 Umdrehungen und 12.500 Kva. Leistung besitzt 16.000 Kg. Statorblech, 15.000 Kg. Rotoreisen, 2000 Kg. Statorkupfer, 2200 Kg. Rotorkupfer, 20.000 Kg. Gehäuseguss, 5800 Kg. Lagerguss, 7200 Kg. Grundplattenguss.

Bohrung	1360	
Eisenbreite	1500	
Aeuss. Blechdurchmesser . . .	2100	
Flux pro Pol	$78 . 10^6$	
108 Statornuten	20×70 bei 10.000 V.	pro Nut: 2 Leiter
32 Rotornuten	40×150	pro Nut: 48 Leiter
Polhornbogen	380	
Luftdistanz	30	
Lagerdistanz	4200	
Amp. Wdgn. p. Pol:	40.000	

Digitized by Google

Die einzelnen Verluste verteilen sich folgendermassen:

Lagerreibung	35 Kw.
Ventilation	90 „
Eisenverluste	80 „
Zusätzl. Eisenverluste . . .	35 „
Kupferverluste	30 „
Zusätzl. Verluste	20 „
Rotorkupfer	45 „
	335 Kw. & 2,7 %.

Bei diesen Verlusten und diesen Ventilationen werden bei 2stündiger Ueberlastung mit 25 % etwa die zulässige Temperatur der Normalien des V. D. E. erreicht.

B. Gleichstromgeneratoren.

Die allgemeinen Regeln über Lagerung und Ventilation die oben erwähnt wurden, haben auch Geltung für *die modernen Gleichstromgeneratoren.* Der Ventilator befindet sich auf der hintern Seite der Armatur und treibt seine Luft achsial zwischen den Statorwicklungen und an der Bohrung hindurch, der Rotor kann in bekannter Weise durch die Verbindung von radialen und achsialen Luftkanälen gekühlt werden. Dem Kollektor strömt in der Regel durch einen besonderen Kanal von unten Kühlluft zu.

Die meisten Firmen verwenden heute ausgeprägte Haupt- und Wendepole und versehen die Hauptpole mit Nuten, in denen eine Kompensationswicklung angeordnet wird. Die Kompensationswicklung kann entbehrt werden, wenn durch genügende Distanz zwischen den Hauptpolschuhen und durch Beschränkung der Armaturamperewindungen dafür gesorgt wird, dass neben der Wendezone keine bedeutenden Lamellenspannungen auftreten können.

Die Armatur wird für die grossen Leistungen im allgemeinen mit Parallelschleifenwicklung ausgerüstet, wobei zwei Leiter pro Nute und Lamelle gewählt werden. Die Isolation soll wärmebeständig sein. Die M. F. Oerlikon verwendet nur Mikanit-Isolation. Es ist vorteilhaft die Nuten und ihre Oeffnungen möglichst schmal zu halten, um zusätzliche Verluste in den Polschuhen und in dem Armaturkupfer zu wermeiden, und die Befestigung der Wicklung zu ermöglichen. Die Zahl der Ampere-

Digitized by Google

leiter auf einer Polteilung geht bis 20000, in einzelnen Fällen deren Erfolg mir unbekannt ist bis 30000. Bei grösseren Zahlen wird eine vollkommene Kompensation an den Wendezonen sehr schwierig. Verhältnissmässig kleine Fehler erzeugen absolute grosse kurzschlussströme u. starke Verzerrungen. Der magnetische Flux eines Poles kann $14 . 10^6$ betragen. Es wird vermieden die maximale Lamellenspannung über 25 Volt zu steigern, wenn die Zahl der Ampereleiter zwischen 2 Lamellen über 400 liegt. Wendepole ohne besondere Kompensationswicklung erhalten in der Regel 20-30 % mehr Amperewindungen als die Armatur besitzt. Kompensationswicklungen erhalten etwa 110 % und daneben die ausgeprägten Wendepole 30 % der Armatur-Amperewindungen.

Der schwierigste Teil der die eigentlichen Schranken für das Wachstum der Leistung und Geschwindigkeit bildet, ist bekanntlich der Kollektor mit den Stromabnahmeapparaten. Bei Turbogeneratoren soll die Umfangsgeschwindigkeit des Kollektors bei Verwendung von Kohlenbürsten 33 m. nicht übersteigen, es scheinen zwar Ausführungen mit 45 m. gelungen zu sein. Bei mittleren Umdrehungszahlen gelten 22 m. als Grenze. Die Befestigung der Lamellen wird fast ausschliesslich mit Pressringen hergestellt, die entweder in heissem Zustande über den Kollektorzylinder geschoben werden, oder nach den Konstruktionen der M. F. Oerlikon (1) mittels Zwischenkeilen auf den Kollektor pressen. Bei einer neueren Konstruktion pressen solche Zwischenkeile die Lamellen von innen nach aussen an den Pressring. Bei diesen Konstruktionen wird eine individuelle nachstellbare Pressung der einzelnen Lamellen erreicht. Es wird grundsätzlich darnach getrachtet, die einzelne Lamelle für sich allein ohne den Gewölbedruck des Kollektors von aussen und innen festzuhalten.

Die Kollektorisolation besteht ausschliesslich aus Glimmer, in der Regel werden an der Kollektoroberfläche die Glimmerlamellen vertieft gehalten, um zu verhindern, dass sie sich über das Kupfer vordrängen können. Je nach der Spannung ist zwischen den einzelnen Bürstenstiften ein hinreichender Abstand festzuhalten. Bis 750 Volt dürfte ein Abstand der Kohlen von 200 m/m auf dem Kollektor genügen.

---

(1) Erfinder Ingenieur Gasser.

Digitized by Google

Die Kohlen decken in der Richtung des Umfanges je nach den Verhältnissen der Kommutationszone 2 bis 3 Lamellen und dürfen an der Kontaktfläche bis 15 Amp. pro cm^2 beansprucht werden. In neuester Zeit scheint die Verwendung der weichen graphitischen Bürsten wieder in den Hintergrund zu treten gegen härtere Kohlensorten. Bürstenhalter mit festgeklemmten Kohlen werden für schnelllaufende Kollektoren nicht mehr verwendet. Metallische Bürsten gelten auch nicht mehr als modern. Im Allgemeinen werden die Kohlen, die möglichst zuverlässig mit Ableitkabeln auszurüsten sind, in Fenstern leicht beweglich geführt und mit Spiralfedern auf den Kollektor gepresst, so dass ungefähr 150 gr. Druck pro 1 cm^2 Kontaktfläche ausgeübt werden. Der Uebergangswiderstand der Kohlen bei den grossen Geschwindigkeiten ist ausserordentlich empfindlich für Ungleichmässigkeiten im Druck, Temperatur, Vibration, Schmierung und Stromdichte und das Parallelarbeiten der gleichpoligen Kohlen- und Bürstenstifte bedarf im Allgemeinen grosser Sorgfalt.

Bei Gleichstromturbogeneratoren ist die Vermeidung der kritischen Tourenzahl infolge der langen dünnen Kollektoren und der grossen Lagerdistanzen sehr schwierig, anderseits ist aber gerade eine vibrationsfreie Bewegung des Kollektors unbedingt erforderlich.

Als Beispiel eines grösseren Gleichstromgenerators sollen einige Daten eines Generators der M. F. Oerlikon für 1100 Kw., 1200 Umdrehungen, 350 Volt gegeben werden:

Polzahl	8	
Rotordurchmesser	1100	
Kollektordurchmesser	550	
Gehäusedurchmesser	1900	
Eisenbreite mit 10 Luftschlitzen	590	
Kollektorlänge	1140	mit 4 Pressringen von 60×100 m/m
Länge zwischen Mitte Lager	3350	
Nutenzahl	200	
Nutendimension	10×46	
Leiter pro Nut	2	
Kollektorlamellen	200	
Flux	$4{,}5 \cdot 10^6$	
Kohlenzahl	8×18	

Digitized by Google

		Dimension 20 × 30
Polkerndimension	76 × 540	
Magnetspulen	700	Windungen.
		Draht 3,2
Hilfspolspulen	8	Spulen parallel 36 Windg.
Gewicht Armaturblech	1600	
Armaturkupfer	450	
Kollektorkupfer.	750	
Rotor total mit Ventilator . .	8300	Kg.
Stator magnetisches Eisen . .	6000	
Kupfer	1300	
Stator total	7300	
Lager	3000	
Platte	3400	
Bürstenbrücke	1600	

Der Wirkungsgrad beträgt 92 %.

Die Leerlaufsverluste betragen 45 Kw.

Für Leistungen von 1000 Kw. bevorzugen bekanntlich alle Systeme von Dampfturbinen viel höhere Umdrehungszahlen als 1500. Aber schon für 1500 Umdrehungen würde ein Gleichstromgenerator mit mehr als 1000 Kw. bei kleineren Spannungen unausführbar. Es liegt daher nahe Mittel zu suchen, um Gleichstromgeneratoren mit ihren ökonomischesten Umdrehungszahlen, durch Zahngetriebe mit Dampfturbinen zu kuppeln, denen ihrerseits auch ihre ökonomischesten Umdrehungszahlen gegeben werden können. Darnach liesse sich etwa folgende Tabelle aufstellen:

3000	Kw.	500	V.	300	Umdrehungen Turbine	1500	Undrehg.
3000	„	250	„	250	„	1200	„
1500	„	500	„	500	„	2500	„
1500	„	250	„	350	„	2000	„
1000	„	500	„	600	„	3000	„
1000	„	250	„	500	„	2500	„
500	„	500	„	750	„	3600	„
500	„	250	„	600	„	3000	„
250	„	500	„	1000	„	4000	„

Ob die Zahngetriebe diese Hoffnungen erfüllen, kann nur der praktische Versuch im Dauerbetrieb entscheiden und es ist zu

Digitized by Google

wünschen und zu erwarten, dass bald möglichst umfangsreiche praktische Versuche bekannt werden.

Oekonomie der Turbogeneratoren.

Es ist beachtenswert, dass die mit den Umdrehungszahlen der Dampfturbinen arbeitenden Drehstrom- und Gleichstromgeneratoren im allgemeinen mit grösseren Herstellungkosten und mit grösseren Verlusten behaftet sind als gleiche Leistungen mit mittleren Umdrehungszahlen; es erscheint also die höchste Oekonomie der Turbogeneratoren schon zu Gunsten der Antriebsmotoren wenigstens nach dem heutigen Stande der Baukunst überschritten zu sein. Es sollen zum Schluss einige Generatoren ähnlicher Leistungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten einander gegenüber gestellt werden.

Drehstromgeneratoren.

Firma	Umdrehgs.-zahl	Leistg.	Polzahl	Gewicht Tonn.	Approx. Preis Frs. $\times 10^3$	Verlust f. Reigb. u. Ventil.	Tot. Verl.
M. F. O.	3000	4000	2	24	53	56	130
Westghs.	3600	3125	2	25	—	—	—
M. F. O.	375	4000	16	40	40	—	—
„	600	4000	10	25,5	40	26	97
„	750	4000	8	23	35	30	100
„	3000	1500	2	15	36	45	100
„	500	1600	12	20	28	15	70
„	1500	4000	4	30	60	50	120
„	1500	12500	4	67	135	190	350
„	1500	7500	4	49	102	150	270
Westghs.	1800	8333	4	53,4	—	—	—
M. F. O.	333	9000	18	81	110	87	240
Projekt	840	7000	6	54	80	100	270
Projekt	500	10000	12	60	115	100	260
A. S.	250	10500	24	100	—	—	260
B. B. C.	375	5300	16	68	—	—	—

Digitized by Google

Firma	Touren	Leistg. Kw.	Spg.	Polzahl	Gewicht Tonn.	Preis Frs. × 10^3	Gesamt-Verl. Kw.	Reibg. u. Vent. Verl. Kw.
M. F. O.	3000	500	6000	2	7	20	38	15
»	750	500	6000	6	6,5	12	39	11
»	3000	1000	6000	2	11,5	30	60	26
»	750	1000	6000	6	10	20	60	22

Die günstigste Umdrehungszahl für Leistungen von 500-15000 Kva. scheint etwa bei 1000 zu liegen mit der Polzahl 6. Diese Polzahl bildet den Uebergang, wo die Kosten und Schwierigkeiten der Konstruktion des rotierenden Magnetrades mit ausgeprägten Polen kleiner ausfallen als der Konstruktion mit zylindrischem Magnet, wenigstens bis zu den angegebenen Leistungen. Aus den mitgeteilten Zahlen ist übrigens ersichtlich, dass für grosse Bereiche der Geschwindigkeiten sich nur kleine Differenzen vom Preis und Wirkungsgrad ergeben können.

Viel auffallender gestalten sich die Verhältnisse der Gleichstromgeneratoren, abgesehen davon, dass die grössten Leistungen mit den Turbogeschwindigkeiten überhaupt nicht ausfühgbar sind.

Firma	Umdrehg.	Leistg.	Spg.	Pole	Gewicht Tonn.	Preis Frs. × 10^3	Verluste Kw.	Reibg. u. Ventil.
S. S. W.	1050	1650	550	8	37	—	—	—
M. F. O.	1200	1100	350	8	23	70	90	45
B. B. C.	1250	1200	500	4	45	—	—	—
M. F. O.	300	3000	350	20	53	100	150	35
»	500	1200	500	12	20	40	60	18
»	750	550	600	6	7,7	17	39	11
»	1600	750	500	6	13,5	45	60	38,5
»	2000	500	500	4	10	36	40	26
G. E. C.	360	1500	600	12	35	—	—	—
»	514	1000	600	8	30	—	—	—
»	1800	600	600	4	11,5	—	—	—
Westghs.	300	c. 2500	600	14	48	—	—	—
»	360	1500	600	12	32	—	—	—
»	720	c. 625	600	6	11,8	—	—	—

Digitized by Google

Firma	Touren	Leistg. Kw.	Spg.	Polzahl.	Gewicht Tonn.	Preis Frs. × 10^3	Gesamt-Verl. Kw.	Reibg. u. Vent. Verl. Kw.
M. F. O.	c. 3000	200	500	4	3,8	15	17	7
„	1000	200	500	4	3,3	11	14	4
S. S. W.	3000	250	600	—	4,8	—	—	—
„	2500	500	750	—	8,9	—	—	—
„	2000	600	400	—	12	—	—	—

Die günstigsten Umdrehungszahlen liegen bei Gleichstromgeneratoren, also tief unter den für Dampfturbinen zweckmässigen Zahlen. Der ökonomische und sichere Bau von Gleichstromgeneratoren ist für jede Spannung hauptsächlich durch die Wahl der passendsten Polzahl bedingt, und es liegt gerade hier für den Konstrukteur bei den Turbogeneratoren eine grosse Schwierigkeit. Aus gleichen Gründen scheint in neuester Zeit die Anordnung von Motorgeneratoren, bei denen die Polzahl des Gleichstromgenerators vollkommen unabhängig von der Umdrehungszahl gewählt werden kann, bei grösseren Leistungen den Einankerumformern überlegen zu werden.

Schlusswort.

Bei der Sammlung der Daten haben mich die Herren Ingenieure Rickli und Däschler in weitem Masse unterstützt. Die Zusammenfassung dieses Vortrages in französischer Sprache hat in selbständiger Weise Herr Ingenieur Legros bearbeitet. Ich erlaube mir hier diesen Herren meinen Dank auszudrücken.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

a) Considérations générales sur le développement des génératrices électriques modernes.

Avant d'énumérer quelques-unes des propriétés des génératrices électriques modernes, nous donnerons une vue d'ensemble de leur développement.

La qualification de " moderne „ que nous donnons à une chose est toute relative: elle dépend du laps de temps que nous considérons. La construction des machines électriques est " moderne „ si nous nous reportons vers 1830, époque où Faraday commençait ses recherches sur l'électromagnétisme. L'emploi des courants polyphasés est plus moderne; en 1888, Ferraris déniait toute valeur pratique aux champs rotatifs qu'il avait découverts. Pour connaître la portée de la qualification de " moderne „ que nous donnons à nos génératrices électriques d'aujourd'hui, il faut nous reporter à une époque où leur réalisation et leur emploi, aujourd'hui universels, nous paraissaient inconcevables.

En 1900, il aurait paru absurde à un constructeur de penser à des alternateurs de 10.000 ch^{x} à 1500 tours par minute ou à des dynamos de 1500 ch^{x} à 1500 tours par minute et de 4000 ch^{x} à 300 tours par minute. Il y a 5 ans, on posait comme limite de puissance des alternateurs 1000 KW à 3000 tours par minute et 5000 KW à 1500 tours par minute. C'est pourquoi il me semble que le caractère moderne des génératrices électriques actuelles réside dans la disparition de ces limites que l'on posait à leur puissance par unité de pôle.

Il est toujours difficile de déterminer le moment où naît la première impulsion vers la réalisation de formes nouvelles; il est probable que, comme dans le monde des organismes, une sélection se fait parmi l'éclosion des inventions et ne laisse subsister que les formes répondant véritablement aux nécessités du milieu, c'est-à-dire aux " exigences du marché „. Hors la présence de ce facteur, qui appelle sans cesse des produits nouveaux, répondant à de nouveaux besoins, peu d'inventions auraient été poussées jusqu'à la réalisation pratique. Les idées les plus fécondes sont restées dans l'oubli, tant qu'elles ne répondaient à aucun besoin de leur temps. Il est arrivé que ce besoin s'est fait sentir après coup, et a donné lieu à une nouvelle éclosion des mêmes idées, viables cette fois. Citons

Digitized by Google

seulement la compensation des dynamos à courant continu dont ne peut plus guère se passer depuis environ 8 ans, aucune dynamo, et qui était déjà, en 1884, décrite par Menges comme un perfectionnement moderne.

Un autre facteur d'évolution de nos constructions est la " nécessité „: Chaque construction nouvelle comporte une part d'imprévu, chaque mode d'utilisation nouveau des machines électriques fait éclore une série de phénomènes jusque là insoupçonnés ou négligés, presque toujours perturbateurs, et qui exigent un nouvel effort d'invention de la part des techniciens.

Mais chacun de ces efforts, chacun de ces progrès, est suivi pas à pas par tous ceux qui combattent avec les mêmes armes sur le même terrain, et qui n'ont de repos que lorsqu'ils ont repris le léger avantage conquis un moment par l'adversaire. C'est le troisième facteur d'évolution: la " concurrence „.

Si l'on nous demande jusqu'à quel point peut aller le mouvement d'évolution signalé ci-dessus, — grandes puissances par unité de pôle —, nous ferons remarquer que l'augmentation de puissance et de vitesse des génératrices électriques a été déterminée par l'accroissement de ces mêmes facteurs du côté moteur: turbines à vapeur et turbines hydrauliques. Le développement de la puissance des unités génératrices actuelles n'est plus entravé que par les considérations économiques et techniques limitant la puissance des moteurs (1).

Cette dépendance entre le développement des machines électriques et leur destination fait aussi que les types que nous considérons aujourd'hui comme définitifs vieilliraient ou même disparaîtraient tout à fait si de nouvelles formes d'énergie ou de courant prenaient plus d'extension que les formes actuellement connues, p. ex., l'emploi d'énergie à haute fréquence, de nouveaux dispositifs d'accumulation d'énergie, etc.

b) Caractéristiques de quelques génératrices modernes.

Nous donnons ci-dessous quelques exemples de génératrices construites par différentes firmes, ou en voie de construction, dont la puissance et la vitesse dépassent de beaucoup les prévisions que l'on pouvait faire il y a quelques années.

(1) Comp. E. HUBER, " Ueber die Grenzen des Maschinenbaues „, conférence devant la Société des sciences naturelles de Zurich, le 21 février 1911.

Digitized by Google

I. Alternateurs triphasés actionnés par turbines à vapeur.

II. Dynamos à courant continu actionnées par turbines à vapeur.

III. Alternateurs triphasés pour vitesses moyennes.

IV. Dynamos à courant continu pour vitesses moyennes.

V. Alternateurs et Dynamos en 1900.

c) Esquisse de la construction des génératrices modernes.

Il y a remarquablement peu de changements à signaler, depuis les dix dernières années, relativement aux principes mêmes de la construction, aux matériaux employés, aux modes de réglage, au rendement; la fréquence et la tension des génératrices sont sensiblement restées les mêmes. L'emploi des hautes tensions produites directement par les alternateurs n'offre que peu d'exemples (Usine de Manojlovak de Ganz & Co. 5200 KVA 30.000 volts), grâce aux avantages des transformateurs statiques.

Quelques types, dont quelques-uns promettaient beaucoup, ont été abandonnés: p. ex., le type homopolaire dit à fer tournant, ainsi que les alternateurs à induit rotatif. D'autres, comme les dynamos à courant continu à haute tension, ne se sont pas répandus. Les nombreux systèmes d'alternateurs compoundés ont eu chacun une vogue passagère, mais aucun ne s'est imposé, et l'ancien mode de réglage par relais et régulateur automatique agissant sur le courant d'excitation a prévalu. Les perfectionnements apportés, dans ces derniers temps, aux appareils de réglage leur permettent de répondre aux exigences les plus sévères, et mettent au second plan, dans le dimensionnement de l'alternateur, la question de la chute de tension. Celle-ci recule de plus en plus, du reste, devant la considération d'économie de matériel, d'augmentation du rendement et de réduction du courant du court-circuit.

D'une manière générale, le matériel se simplifie et s'unifie. Les alternateurs se font exclusivement à induit fixe et inducteur tournant excité par du courant continu; les alternateurs asynchrones n'étant employés qu'exceptionnellement.

La demande des grands alternateurs-volants est tombée rapidement avec celle des machines à vapeur à piston; leur étude ne présente plus guère d'intérêt. Quant aux alternateurs à pôles extérieurs pour moteurs à explosion, leur développement est entravé par la puissance relativement faible des moteurs et l'énorme poids requis par le volant.

Le développement énorme de la puissance des turbines hydrauliques a déterminé un accroissement équivalent de la puissance des alternateurs

Digitized by Google

de vitesse moyenne, p. ex., 750 tours par minute. Ici, la lutte pour la meilleure utilisation du matériel a été si active, qu'en 5 ans les alternateurs et les dynamos ont été amenés à une puissance double pour le même poids et le même nombre de tours par minute, sans qu'il y ait eu de modification sensible dans leur mode de construction. Cette évolution s'est faite tout naturellement, sans qu'on puisse la relier à une invention déterminante quelconque, mais, peut-on dire, suivant la voie naturelle du progrès. On peut y distinguer cependant quelques points de vue principaux.

D'abord la réduction graduelle des phénomènes secondaires, comme les champs de dispersion, les harmoniques supérieures des courbes de tension, les pertes supplémentaires, etc., soit en quelque sorte un calcul de machine en seconde approximation.

En second lieu, la réduction des pertes spécifiques dans les circuits électriques et magnétiques, par l'emploi d'encoches nombreuses, le feuilletage et le profilage des pièces polaires, la subdivision des sections de cuivre, l'emploi d'amortisseurs, et l'usage de tôles à faible coefficient de pertes, permettent de saturer de plus en plus les parties actives des machines sans augmenter la somme des pertes tendant à l'échauffement.

En troisième lieu, la proscription de plus en plus complète des pièces coulées dans la partie tournante, afin de pouvoir en assurer la solidité dans tous les détails, et de conserver la même sécurité malgré l'augmentation des efforts spécifiques.

Enfin, et surtout, l'emploi judicieux de la ventilation artificielle, permettant d'obtenir du courant d'air traversant la machine le maximum d'efficacité et de maintenir l'échauffement dans les limites de sécurité, malgré la diminution constante des surfaces de rayonnement.

Mais ces progrès ne sont, comme nous l'avons dit, qu'une sorte d'affinage des méthodes de construction connues déjà il y a une dizaine d'années, les formes types étant restées les mêmes.

C'est seulement avec les turbo-alternateurs à 2, 4 et 6 pôles *que nous assistons à l'éclosion d'une forme vraiment nouvelle: le* rotor cylindrique, *pressenti depuis longtemps déjà, il est vrai, mais introduit seulement sous sa forme définitive en 1901, par la construction géniale de Charles Brown. Il est difficile de démontrer les avantages de l'inducteur cylindrique, mais il faut constater, de l'avis des constructeurs de plus en plus nombreux, qui l'ont adopté, qu'il se prête merveilleusement à toutes les puissances, de 100 à 20.000 KVA à 25 et à 50 périodes par seconde, 2, 4 et 6 pôles. Avec environ 80.000 ampère-tours par pôle, un inducteur cylindrique bipolaire, ayant un pas polaire de 1,5 m., peut faire passer dans l'induit 150 $\times$ 10^6 lignes de force magnétiques par pôle. Ces chiffres se rapportent à un turbo-alternateur de 10.000 KVA, 25 cycles, 1500 tours*

Digitized by Google

par minute. Le corps cylindrique et les bobines peuvent être ventilés énergiquement; la consolidation des enroulements dans les encoches est si régulière qu'il suffit de quelques dizaines de grammes de balourd pour les équilibrer: enfin l'ensemble des clavettes et des frettes de tête constitue tout naturellement un amortisseur parfait. Ce type d'inducteur est adopté actuellement par Brown, Boveri & Co. A. E. G., Siemens-Schuckert, Ateliers de Construction Oerlikon, S^té Alsacienne (Belfort), Westinghouse Co., G. E. Cie. Chez les uns les encoches sont soit estampées dans les tôles, soit fraisées dans la masse du cylindre; chez d'autres (A. E. G. et G. E. Co.), les dents servant à maintenir les enroulements sont encastrées entre ceux-ci dans le corps cylindrique.

Le progrès le plus important à signaler dans la construction des dynamos à courant continu *est l'emploi général des* enroulements compensateurs *et des pôles auxiliaires, qui permettent, quelle que soit la forme et l'intensité du champ inducteur, d'obtenir une bonne commutation même avec 10.000 ampère-tours par pôle sur l'induit, et une tension lamellaire moyenne de 16 volts. Parmi les dynamos énumérées plus haut, il s'en trouve qui, sous une tension lamellaire moyenne de 16 volts, ont à commuter 400 ampères-tours par bobine, soit une puissance moyenne de 6400 watts. Les limites de vitesse et de puissance restent cependant bien inférieures aux chiffres donnés pour les alternateurs, et cela pour deux causes principales.*

La première est que, malgré toute l'ingéniosité du système compensateur, son action est influencée par une quantité de phénomènes secondaires: oscillation et distorsion des champs dans la zone de commutation, par suite de la discontinuité de la surface d'entrefer et de la surface du collecteur, oscillations et asymétrie du champ inducteur, répartition inégale des courants induits dans les circuits en parallèle, tous éléments dont il est très difficile de prévoir les effets par le calcul.

La seconde cause tient à la captation du courant: malgré les nombreuses qualités de charbons dont on dispose, la perfection que l'on atteint maintenant dans l'usinage des collecteurs, la longue expérience que l'on possède de tous les types de porte-balais, les limites de densité de courant et de vitesse périphérique, que l'on donnait autrefois pour le dimensionnement des collecteurs, n'ont pas été depassées notablement. Si même l'on possédait un système compensateur parfait, ces deux éléments, — surface et vitesse périphérique du collecteur —, suffiraient à limiter la puissance et la vitesse des dynamos. Pour profiter entièrement des avantages qu'offrent les moteurs à grande vitesse, il reste deux moyens: répartir la puissance du moteur sur deux ou plusieurs dynamos montées sur le même arbre, ou réduire la vitesse au moyen d'une transmission. La construction de

Digitized by Google

transmissions pour grandes puissances et grandes vitesses est donc un des problèmes les plus importants de la technique actuelle: sa solution permettrait de choisir les deux unités, moteur et génératrice, indépendamment l'une de l'autre, c'est-à-dire dans les meilleures conditions d'économie et de rendement.

d) Dimensionnement des alternateurs modernes.

Comme nous l'avons dit, nous entendons sous ce nom des alternateurs de très grande puissance par unité de pôle, et nous allons esquisser les points à prendre en considération dans le calcul. Il s'agit ici, en particulier, d'un alternateur bipolaire de 5000 KVA, 50 périodes par seconde, et d'un alternateur à 4 pôles, de 12.500 KVA, 1500 tours par minute, 50 périodes par seconde.

Caractéristiques mécaniques.

Tourillons de l'arbre: la vitesse périphérique atteint 25 m : s et la pression rapportée à une section diamétrale, 5 Kg : cm².

Dimensionnement de l'arbre: en supposant que la construction du rotor soit telle qu'il se comporte comme un corps homogène, c'est-à-dire que l'équilibrage établi avec soin ne soit pas influencé par les variations de température ou d'excitation, on peut toujours maintenir la vitesse critique au moins 25 % au-dessus de la vitesse normale. La flèche de l'arbre se calcule graphiquement, ou par des formules approchées (voir texte allemand).

Tensions spécifiques des matériaux employés.

On se base sur ce que les efforts spécifiques, pour une vitesse d'emballement de 40 % supérieure à la vitesse normale, restent inférieurs à la limite des allongements proportionnels. Les parties les plus exposées sont les dents, les clavettes, les frettes et les bandages qui maintiennent les enroulements.

Limites des allongements proportionnels de divers matériaux *(voir texte allemand).*

On exclut toute pièce coulée à cause des difficultés de vérification des matériaux. On donne la préférence aux métaux à grand allongement à la rupture, qui répartissent mieux les efforts locaux et dont la déformation est telle que la marche de la machine est perturbée bien avant la rupture.

Digitized by Google

Pertes mécaniques.

Les pertes dans les coussinets s'estiment en watts à environ 12 × F, F étant la section diamétrale du tourillon. Les pertes dues à la résistance de l'air atteignent, à 100 m : s de vitesse périphérique, environ 0,5 watt par cm² de surface cylindrique.

Refroidissement des coussinets.

La lubrification par l'huile sous pression, refroidie par circulation, s'est généralisée. Avec 30° C d'échauffement on fait passer environ 1,5 litres d'huile par minute et par kilowatt dissipé.

Ventilation.

L'action refroidissante du rayonnement superficiel est négligeable vis à vis de l'action de l'air circulant dans toutes les parties de la machine. La quantité d'air nécessaire théoriquement, en admettant 20° C d'échauffement, est de 2 Kg. par minute par KW d'énergie à éracuer. On prend pratiquement le double de cette quantité. La production de cette quantité d'air entraîne dans les conditions normales, soit une vitesse de 15 m : s dans les canaux, une pression de 150 mm. de colonne d'eau et 30 % de rendement du ventilateur, une dépense supplémentaire d'énergie d'env. 300 watts. Le refroidissement est un des points les plus importants de la construction des génératrices à grande vitesse. La tâche du constructeur est de proportionner les surfaces de refroidissement aux pertes d'énergie dans les enroulements et dans le corps feuilleté de l'induit, en tenant compte des expériences sur l'écoulement de la chaleur, notamment à travers les isolants et les paquets de tôles, de manière qu'en aucun point les limites de température admissibles ne soient dépassées.

Le calcul détaillé des dimensions des canaux de ventilation, de la température interne des tôles et des bobines en fonction de la température de l'air refroidissant et des pertes est donné dans le texte allemand.

Le calcul du refroidissement du rotor, sur la base de 10.000 ampères par encoche et 100.000 ampère-conducteurs par pôle, montre que le refroidissement naturel par la surface cylindrique est insuffisant à maintenir l'échauffement des conducteurs en dessous de 30° C, à moins d'adopter une densité de courant inférieure à 0,8 A : mm², ce qui est impraticable. La ventilation artificielle du rotor est donc nécessaire. Elle permet de pousser la densité du courant jusqu'à 3 A : mm².

Dans les constructions les plus récentes, la ventilation du rotor est indépendante de celle du stator. L'air est aspiré des deux côtés, suivant l'axe, et est évacué dans l'entrefer où il rejoint le courant d'air prin-

Digitized by Google

cipal refroidissant l'induit. La ventilation du stator est — tantôt radiale, l'air émis par les ventilateurs étant refoulé des deux côtés de l'induit, pénétrant dans l'espace d'entrefer et de là dans les canaux de ventilation qui divisent le corps feuilleté, — tantôt axiale, comme dans le remarquable dispositif de Siemens-Schuckert, l'air étant injecté dans des canaux longitudinaux ménagés dans les encoches le long des conducteurs et dans le corps feuilleté.

Caractéristiques électriques.

Pour accroître la puissance d'un alternateur dont le nombre de pôles est donné, ainsi que la fréquence, il faut augmenter, soit le flux magnétique de l'entrefer, soit les ampères-conducteurs totaux, soit la vitesse périphérique. La vitesse périphérique est limitée par les pertes dues au laminage de l'air dans l'entrefer, et par la résistance mécanique des matériaux, qui atteint sa limite à la vitesse d'environ 150 m : s à la périphérie de l'inducteur. Il semble donc que 110 m : s en service normal constitue la limite de vitesse périphérique pour les types actuels.

Le nombre d'ampères-conducteurs induits qui suppose un nombre au moins double d'ampères-conducteurs, est limité par ce dernier. Inducteurs, 100.000 ampères-conducteurs par pôle à l'excitation semblent être le maximum actuel fixant la limite des ampères-conducteurs induits à environ 400 par cm.

Le flux magnétique enfin, pour une induction magnétique donnée, 10.000 p. ex., est limité par la longueur de l'induit, assujettie elle-même aux conditions de résistance mécanique de l'arbre et à l'efficacité de la ventilation. On peut donner, p. ex., 120 cm. à 3000 tours par minute et 200 cm. à 1500 tours par minute comme maximum praticable pour la longueur de l'induit, soit respectivement 60 . 10^6 et 100 . 10^6 comme flux maximum possible par pôle.

Les considérations ci-dessus donnent pour les puissances maxima pratiquement réalisables: 5700 KVA à 3000 tours par minute, et 19.000 KVA à 1500 tours par minute.

Les puissances exécutées jusqu'aujourd'hui atteignent, respectivement, 440 et 12.500 KVA.

Au point de vue de l'exécution du bobinage, nous mentionnerons seulement les détails suivants, particuliers aux alternateurs de grande puissance: l'isolement au moyen de micanite et d'asbeste exclusivement supportant sans détérioration la température de 100° que peuvent atteindre les conducteurs au centre des encoches, la subdivision des conducteurs dès que leur section totale dépasse 200 mm^2 afin de réduire les pertes par courants de Foucault, l'imprégnation des bobines afin d'éviter les

Digitized by Google

effets d'ozonisation détruisant les isolants, enfin la consolidation mécanique des bobines sur les deux faces de l'induit pour prévenir les effets destructeurs des court-circuits brusques.

Les bobines inductrices sont maintenues dans les encoches du rotor par des clavettes métalliques, qui servent de dispositif amortisseur. On peut ainsi réduire les pertes supplémentaires en court-circuit à 75 % des pertes Joule en triphasé, à 150 % en monophasé.

La forme de la caractéristique à vide est telle qu'une élévation de tension de 30 % se manifeste entre la pleine charge inductive et la marche à vide sous la même excitation.

Le rendement des turb-alternateurs modernes est, en général, moindre que le rendement des alternateurs de même puissance de vitesse moyenne, par suite de l'importance des pertes par friction et ventilation.

Suivent deux exemples *(voir texte allemand)*.

e) Dynamos à courant continu.

En général, l'air produit par un ventilateur latéral traverse la dynamo parallèlement à son axe et rafraîchit les bobines inductrices ainsi que la surface cylindrique de l'induit. Le rotor est ventilé par des canaux dans le sens de l'axe et dans le sens radial. Le collecteur reçoit, à sa partie inférieure, de l'air qui débouche d'un canal ménagé dans la plaque de fondation. Les pôles de commutation et les enroulements compensateurs sont d'emploi courant. L'enroulement le plus fréquent est l'enroulement imbriqué, en parallèle, avec deux conducteurs par encoche et par lamelle. On va jusqu'à 20.000, même 30.000 ampères-conducteurs par pôle. La tension lamellaire peut atteindre 25 volts, la vitesse à la périphérie du collecteur, 35 et même 45 m : s. Les frettes de collecteur ont fait l'objet de brevets spéciaux (Oerlikon-Gasser), qui visent à maintenir les lamelles extérieurement et intérieurement, indépendamment de la poussée des lamelles voisines. Les lamelles isolantes se font exclusivement en mica. Les types de porte-balais sont tous à jeu libre de charbons. La qualité de ceux-ci n'est pas encore fixée; les charbons durs semblent cependant reprendre l'avantage sur les charbons graphitiques. Les balais métalliques sont de moins en moins employés. Ils recouvrent 2 à 3 lamelles du collecteur, et admettent une densité de courant allant jusqu'à 15 amp. par cm². La sensibilité, aux grandes vitesses, de la résistance de contact, rend le fonctionnement en parallèle des balais très difficile.

Le calcul de l'arbre à la vitesse critique est plus délicat que pour les alternateurs à cause de la longueur supplémentaire requise par le collecteur.

Digitized by Google

Caractéristiques d'une dynamo de 1100 KW, 1200 tours, 350 volts *(voir texte allemand).*

Un tableau comparatif des vitesses de rotation les plus avantageuses de la turbine à vapeur et de la dynamo, de 3000 à 250 KW (voir texte allemand), fait ressortir le grand intérêt qu'il y aurait à disposer d'un accouplement à réduction de vitesse de fonctionnement sûr et de bon rendement.

DISCUSSION

M. C. SARLI (Berlin) *applaudit à la magistrale communication du Dr. Behn-Eschenburg. Il y constate quantité de précieuses données expérimentales. A son tour, il émet quelques considérations sur les alternateurs de très grande puissance, accouplés aux turbines hydrauliques. Au point où nous en sommes, le problème est de construire des alternateurs de 20.000 KVA et plus, dont les inducteurs puissent supporter les vitesses d'emballement des turbines qui les actionnent, vitesses qui arrivent à surpasser la normale de 80 %, et impriment à l'inducteur des vitesses périphériques de 110 à 120 mètres par seconde. Les essais des inducteurs à la vitesse d'emballement des turbines acquièrent de jour en jour, et avec raison, une importance plus considérable, car leurs résultats justifient ou condamnent les calculs des constructeurs, en même temps qu'ils servent à contrôler la qualité des matériaux employés. De tels essais sont maintenant entrés dans la pratique courante: le client veut les voir exécuter dans l'usine de construction, avant livraison, et certains constructeurs les font de leur propre initiative. La fâcheuse prérogative de l'emballement dont jouissent les turbines augmente le coût des unités génératrices et tend à limiter leur puissance: il serait vivement à désirer qu'on trouvât le moyen d'empêcher l'emballement, ou tout au moins de déclancher automatiquement le couplage de l'alternateur avec la turbine quand celle-ci tend à dépasser notablement la vitesse normale.*

Un autre point, d'importance capitale dans la construction de ces alternateurs de grande puissance, est celui de la ventilation. Un alternateur de 20.000 KVA dissipe environ 600 Kw., soit 140 calories qui récla-

Digitized by Google

ment, pour leur absorption, à peu près 2500 m. c, d'air par minute. Cette condition impose une sérieuse étude des meilleurs systèmes de ventilation à ceux qui établissent les projets de construction d'une centrale moderne.

Il leur faut tenir compte de cette grosse circulation d'air chaud et froid, qui doit s'opérer par des voies indépendantes; de son côté, le constructeur des alternateurs doit donner aux ventilateurs des proportions rationnelles; les ailettes de ces derniers peuvent éventuellement être fixées sur la roue polaire.

Examinant ensuite les limites de tension qu'il n'est encore pas prudent de dépasser, M. Sarli exprime l'opinion que si l'on peut, en parfaite sûreté, construire des alternateurs pour 15.000-20.000 Volts, il serait, actuellement, fort risqué d'aller au-delà, quoiqu'en puissent dire les partisans des tensions très élevées. Même en employant ce que la technique moderne est en état d'offrir de plus parfait comme matière isolante, même en noyant les bobines de l'induit dans la matière de façon à remplir complètement les interstices et à former une masse parfaitement imprégnée et enduite de cette matière, il n'est pas niable qu'un alternateur donné n'offre plus à 30.000 Volts les garanties de fonctionnement qu'il peut donner à 15.000. Pour des tensions très élevées, M. Sarli est d'avis qu'il est préférable de recourir à la transformation. On ne peut plus objecter le rendement, car on construit aujourd'hui des transformateurs à 99 % de rendement. De plus, il est notoire que le transformateur protège les machines contre les surtensions, et, encore, qu'à dommages égaux, la réfection d'un transformateur est plus rapide et moins coûteuse que celle d'un alternateur.

Parlant enfin du courant de court-circuit, M. Sarli observe que les essais que l'on exige d'alternateurs excités au maximum et mis en court circuit pendant deux ou trois minutes, lui semblent excessifs, tandis que, d'autre part, on prétend que de la pleine charge à zéro l'élévation de la tension ne soit pas trop sensible. Il croit que pour éviter les effets graves des court-circuits qui, pendant les premiers instants, absorbent de 30 à 40 fois le courant normal, il est préférable de construire les machines pour des élévations de tension un peu fortes et des courants de court-circuit de moindre intensité, quitte à employer éventuellement des appareils automatiques pour régler la tension.

M. C. Feldmann (Delft) *partage l'opinion doctement développée par M. Behn-Eschenburg, que l'augmentation de puissance des générateurs résulte essentiellement des meilleurs rendements obtenus, grâce à une plus parfaite utilisation des matériaux, et surtout grâce aux progrès réalisés dans l'exécution des moyens servant à refroidir les machines, dans le mode d'emploi des matériaux dont elles sont faites, dans les soins que*

Digitized by Google

l'on apporte à augmenter artificiellement les surfaces de refroidissement. A l'égard des alternateurs accouplés directement aux moteurs à grande vitesse, il reconnaît tous les avantages d'un inducteur absolument cylindrique et note, à ce propos, que les avantages de nature mécanique surpassent les avantages électriques, surtout dans les générateurs à plus de deux pôles.

En ce qui concerne les turbo-dynamos et à l'égard des pôles de compensation, il est informé que quelques maisons les ont adoptés, mais il ignore que presque toutes l'aient fait. Il reconnaît l'importance de ce système au point de vue de la fréquence, et il cite l'exemple d'un turbo-dynamo à 4 pôles des " Siemens-Schuckert W'erke „, de 550 KW et 440 volts à 2700 tours par minute, qui a, par conséquence, une fréquence de $\frac{4 \times 2700}{2 \times 60} = 90$ *périodes par seconde. Pour des machines de ce type, une pareille fréquence peut être atteinte avec une faible saturation du fer et moyennant un bon refroidissement. Les lames du collecteur sont percées de trous et ventilées dans le sens de l'arbre de l'inducteur.*

M. Feldmann conclut en se déclarant pleinement d'accord avec le Dr. Behn-Eschenburg quant à la vitesse plus convenable pour ce type de machine.

M. E. J. Brunswick (Paris) *observe qu'une fréquence élevée (de l'ordre de 100 périodes par seconde) pour le magnétisme des machines à courant continu à grande vitesse de rotation est rendue nécessaire si l'on veut n'avoir dans l'induit qu'un flux modéré; il faut nécessairement alors admettre des inductions faibles pour éviter des pertes excessives dues aux courants parasites.*

Les exigences mécaniques imposent d'autre part pour l'induit un diamètre trop réduit en général pour permettre de le doter de plus de 4 pôles au maximum.

L'augmentation du nombre de paires de pôles est de son côté avantageuse pour la commutation en ce sens qu'elle permet de diminuer l'intensité par ligne de balais.

Il s'ensuit que le constructeur doit chercher à établir une compensation entre les avantages et les inconvénients d'une fréquence élevée.

L'emploi de tôle au silicium à faible coefficient hystérétique et de haute résistivité est tout indiqué. On voit tous les jours des constructeurs offrir des turbo-dynamos à courant continu de très grande puissance à 3000 tours par minute et 4 pôles. M. Brunswick estime toutefois qu'il est mieux, quand rien ne l'empêche, de s'en tenir à des vitesses moindres. Il signale particulièrement les vitesses périphériques de 110 m : s, qu'il trouve vraiment un peu trop élevées.

Digitized by Google

En effet, étant donnée la nature des matériaux employés dans la construction des parties mobiles d'un alternateur ou d'une dynamo à courant continu, il se trouve qu'à la vitesse de 100 m : s ceux-ci atteignent déjà la contrainte pratique limite qu'ils peuvent supporter ; or une accélération, possible d'ailleurs, de 20 % de la vitesse normale engendre une augmentation de 40 % dans la force centrifuge, et fait dépasser ainsi les limites de sécurité conseillables. Mieux vaut donc rester au-dessous de 100 m : s de vitesse périphérique et s'en tenir, par exemple, à 80 à 90 m : s, valeur que, du reste, on dépasse rarement dans les machines modernes.

M. S. P. THOMPSON (Londres) *exprime toute son admiration pour le beau travail du Dr. Behn-Eschenburg et demande quelques renseignements sur les prix des machines en discussion.*

M. H. BEHN-ESCHENBURG (Oerlikon) *dit: Je remercie toutes les personnes qui ont pris part à la discussion. M. Sarli m'a très justement fait observer que dans les usines électriques existantes, où nos machines doivent être installées, la ventilation laisse beaucoup à désirer. C'est une question importante qui demande à être sérieusement étudiée.*

Je répondrai à M. Feldmann et à M. Brunswick qu'à l'égard du nombre de pôles pour les machines à courant continu, il convient plûtot de donner un plus grand nombre de pôles à une machine de grande puissance qu'à une machine de puissance modérée. Cela est certainement plus avantageux que d'augmenter la puissance individuelle de chaque pôle. La puissance d'un pôle est limitée par le nombre total des ampère-tours: la compensation est d'autant plus difficile, qu'est plus grand leur nombre absolu.

Je remercie tout spécialement M. Thompson de ses courtoises expressions.

En ce qui concerne le prix des machines, il est assez évident qu'il ne dépend pas seulement de l'emploi rationnel des matériaux et de la main d'œuvre, mais aussi, et en grande partie, de la valeur vénale, aux différentes époques, de cette main d'œuvre et de ces matériaux.

On trouvera dans le dernier tableau qui accompagne mon rapport, que le prix de grands générateurs triphasés est d'environ 10 francs par Kw. de puissance; pour les générateurs à courant continu, le prix actuel du Kw. est de 30 francs environ.

Le Président *remercie M. Behn-Eschenburg et les diverses personnes qui ont pris part à la discussion.*

Digitized by Google

Sur les phénomènes électro-magnétiques résultant de la mise en court-circuit brusque d'un alternateur.

P. Boucherot (Paris).

L'usage des puissants alternateurs à grande vitesse angulaire, mûs par turbines à vapeur, a mis en évidence depuis quelques années l'importance de phénomènes accessoires, qui étaient jusqu'alors passés presque inaperçus avec les alternateurs ordinaires à grand nombre de pôles.

Au point de vue purement électro-magnétique, ce qui caractérise en effet le turbo-alternateur, c'est la petitesse des fuites magnétiques qu'entraîne le petit nombre de pôles. Alors que dans un alternateur-volant, l'ensemble des fuites de l'inducteur et de l'induit dépasse souvent, pour un pôle, 50 % du flux utile par pôle, dans un turbo-alternateur il n'est pas rare que ce rapport reste inférieur à 10 %.

Cette petitesse des fuites magnétiques produit de grands effets lors des courts-circuits.

Je me propose d'examiner ici, aussi succintement que possible, quelques-uns des cas singuliers qui peuvent se produire en pratique.

De prime abord l'apparence des phénomènes est très com-

Digitized by Google

pliquée : c'est ce qui frappe le plus lorsque l'on se trouve mis en présence de relevés oscillographiques obtenus par l'expérience. Mais par une discussion serrée, et moyennant la négligence de faits secondaires peu importants, on parvient à voir assez clairement ce qui peut se passer dans les différents cas, sans avoir recours à autre chose qu'aux notions les plus connues de la Physique.

Afin de ne pas rebuter ceux des lecteurs qui désirent seulement avoir une idée d'ensemble de la question, je n'ai mis que très peu de calculs dans le texte principal : les développements mathématiques sont renvoyés dans des notes annexées, que le lecteur pourra étudier à part si bon lui semble.

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il est nécessaire de préciser la signification de quelques expressions qui seront employées au cours de ce Mémoire, et dont la nette distinction est indispensable à la compréhension de ce qui suivra.

I. — **Des divers coefficients d'inductance qu'il y a lieu de considérer pour un des circuits d'un alternateur.**

On entend souvent par coefficient de self-induction, ou self-inductance d'un circuit, des choses très différentes. Il vaut mieux, si l'on veut se faire comprendre, employer des expressions différentes pour des choses différentes. A défaut d'une entente internationale à ce sujet, qui est encore à venir, je me conforme aux règles qui découlent des considérations qui vont suivre.

Lorsqu'un circuit électrique est seul, ou en présence d'autres circuits ouverts, ce qui revient au même si les effets de capacité sont négligeables, il a un coefficient de self-inductance L et c'est tout. Ce coefficient est défini par le produit $n\mathcal{F}$ du nombre de spires n du circuit par le flux magnétique $\mathcal{F}$ qu'il embrasse lorsqu'il est parcouru par un courant égal à une unité C G S, c'est-à-dire 10 ampères. C'est là son coefficient de self-induction, ou sa self-inductance, et il n'y a pas lieu d'appliquer cette expression à autre chose.

Mais si les autres circuits sont fermés sur eux-mêmes, ou sur quoi que ce soit, il y a d'autres coefficients à envisager utilement pour le premier circuit considéré, et par conséquent aussi pour chacun des autres.

Considérons d'abord le cas simple où deux circuits électriques

Digitized by Google

sont en présence et fixes dans un milieu de conformation magnétique invariable (transformateur). Ils ont chacun un coefficient de *self-inductance,* L_1 pour le primaire, L_2 pour le secondaire, défini comme il vient d'être dit, l'autre étant ouvert.

Ils ont entre eux un coefficient de mutuelle inductance M correspondant à la portion du flux émis par l'un d'eux embrassée par l'autre ; de ce fait, ils ont des coefficients de *self-inductance de fuites*, $\mathfrak{L}_1$ pour le primaire, $\mathfrak{L}_2$ pour le secondaire, donnés par les relations :

$$\mathfrak{L}_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M$$

$$\mathfrak{L}_2 = L_2 - \frac{n_2}{n_1} M .$$

Enfin, si l'un des circuits est supposé alimenté lorsque l'autre est fermé sur lui-même en court-circuit, il a une self-inductance apparente très différente de sa self-inductance véritable et de sa self-inductance de fuites ; ce n'est pas, à proprement parler, une self-inductance, puisqu'alors la mutuelle intervient, c'est une inductance ; et comme dans ces conditions le flux qu'embrasse ce circuit est la somme des flux des fuites des deux, j'emploie pour ce coefficient apparent l'expression d'*inductance des fuites totales* ramenées dans ce circuit. Cette inductance peut être envisagée pour l'un ou l'autre des circuits et a les valeurs suivantes :

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \text{ au primaire,}$$

$$N_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_2} \text{ au secondaire.}$$

On trouvera dans la note annexée n. 1 quelques explications et justifications à l'appui de ce que je viens de dire.

Il y a donc, indépendemment du coefficient de mutuelle inductance, 3 coefficients d'inductance à considérer pour chacun des circuits.

Mais il ne s'agit là que d'un transformateur statique dans lequel la mutuelle induction est constante. Que deviennent ces coefficients pour un alternateur dans lequel la mutuelle est variable avec le temps ?

Digitized by Google

La réponse n'est pas simple. Elle dépend à la fois des circuits que l'on envisage et de la nature de l'alternateur quant au nombre de phases et à la constitution de l'inducteur.

Plaçons-nous d'abord au point de vue du circuit inducteur seul.

Il se trouve fort heureusement que pour un alternateur diphasé, placé, bien entendu, dans des conditions telles qu'il puisse être toujours considéré comme système diphasé, et dénué d'harmoniques, les trois coefficients d'inductance conservent entièrement leurs significations et leurs valeurs pour le *circuit inducteur*, avec cette seule modification que M est le maximum du coefficient de mutuelle inductance de ce circuit avec chacun des circuits d'induit (Voir note annexée n. 2).

Il en va de même évidemment pour tout autre alternateur polyphasé sous réserve du changement que peut apporter aux valeurs numériques la mutuelle induction constante entre les circuits d'induit. L'alternateur diphasé est le seul en effet des alternateurs polyphasés dans lequel les circuits d'induit n'aient pas de mutuelle inductance entre eux ; pour cette raison il est toujours plus commode d'établir les théories générales concernant les alternateurs polyphasés au moyen du diphasé pris comme type.

Ainsi, en résumé, pour un alternateur polyphasé les trois coefficients d'inductance du circuit inducteur conservent les significations et valeurs symboliques qu'ils ont pour l'un des circuits d'un transformateur statique monophasé.

Il n'en est plus de même malheureusement pour un alternateur monophasé. Bien qu'en apparence plus simple, cet appareil conduit toujours à des résultats plus complexes quand on veut en approfondir l'étude. La self-inductance de chacun des deux circuits, inducteur et induit, peut être et est généralement constante, mais la self-inductance de fuites et l'inductance des fuites totales ne sont plus constantes : ce sont des fonctions périodiques du temps, et, de ce fait, tous les problèmes se trouvent compliqués (Voir note annexée n. 3).

Plaçons-nous maintenant au point de vue des circuits induits.

On voit immédiatement que même si l'alternateur est polyphasé, *s'il n'y a qu'un circuit inducteur,* les coefficients d'inductance de fuites ne sont pas constants pour les circuits d'induit. Dans le cas du diphase, par exemple, l'un des circuits induits n'a de mutuelle induction qu'avec le circuit inducteur ; il se trouve donc, en ce qui concerne ses coefficients de fuites, dans

Digitized by Google

la même situation que l'inducteur d'alternateur monophasé que nous venons d'envisager précédemment.

Il en est tout autrement si le système inducteur possède un autre circuit fermé sur lui-même en quadrature avec le circuit inducteur, et que nous appellerons circuit *amortisseur*. Les coefficients d'inductance de fuites des circuits induits reprennent alors la signification et la valeur qu'ils ont dans le transformateur statique, même pour un alternateur monophasé. L'inducteur constitue alors, en effet, à notre point de vue spécial, un système polyphasé ; les courants qui circulent dans ses deux circuits réagissent sur ceux de l'induit comme ceux d'un induit polyphasé réagissent sur l'inducteur.

Résumons-nous. Si les deux parties d'un alternateur sont constituées toutes deux en systèmes polyphasés, les coefficients d'inductance de fuites conservent les significations et les valeurs qu'ils ont dans un transformateur statique pour *tous* les circuits. Si une seule des parties est polyphasée, il n'en est ainsi que pour les circuits de l'autre.

La question doit se poser maintenant de ce qu'on peut entendre par circuit amortisseur. Jusqu'ici nous avons entendu par là un circuit, non pas identique comme nombre de spires et section de fil au circuit inducteur, cela n'est pas nécessaire, mais tout au moins contenant la même quantité de cuivre disposée semblablement quoique en quadrature.

Il est clair cependant qu'entre cet amortisseur parfait et l'absence complète d'amortissement, il y a place pour une infinité de solutions pratiques possibles qui se rapprocheront plus ou moins de l'amortissement parfait. Dans ce cas se trouveront des pôles massifs, des inducteurs feuilletés traversés par de forts boulons d'assemblage formant plus ou moins cage d'écureuil, etc.

Pratiquement on sera conduit à examiner ce qui se passe dans les deux cas extrêmes, avec ou sans amortisseur parfait, et à conclure suivant la nature de l'amortissement réellement existant dans l'alternateur.

II. — **Court-circuit brusque polyphasé.**

Un alternateur polyphasé étant à vide, le flux dans l'inducteur est constant et égal à:

$$\mathfrak{F}_1 = \frac{L_1}{n_1} J ;$$

Digitized by Google

où J est le courant continu d'excitation.

Le flux tournant dans l'induit, qui est aussi le flux maximum dans chaque phase d'induit, est:

$$\mathcal{F}_2 = \frac{M}{n_2} J.$$

Et la force électromotrice efficace par phase:

$$E_2 = \frac{\omega M J}{\sqrt{2}}.$$

Lorsque cet alternateur est en court-circuit sur toutes ses phases depuis longtemps, le courant efficace par phase est:

$$I_{2cc} = \frac{E_2}{\omega L_2} = \frac{MJ}{\sqrt{2} L_2},$$

en négligeant la résistance devant la réactance.

Les flux sont alors considérablement réduits. Dans l'induit le flux est nul puisqu'on suppose les enroulements sans résistance: le flux dans l'induit est la résultante du flux de fuites d'induit et d'un flux égal et contraire que lui envoie l'inducteur. Dans l'inducteur le flux est la résultante du flux de fuites de l'inducteur et du flux de fuites d'induit changé de signe. Par un calcul identique à celui fait dans la note annexée n° 1 pour le transformateur, on trouve ainsi pour ce flux inducteur

$$\mathcal{F}_{1cc} = \frac{J}{n_1} N_1.$$

Il y a donc pendant le changement de régime, pendant l'état variable qui suit immédiatement la mise en court-circuit brusque, une variation de flux dans l'inducteur:

$$\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc} = \frac{J}{n_1} (L_1 - N_1).$$

Si la résistance du circuit inducteur est R_1, il en résulte une quantité d'électricité induite dans ce circuit:

$$\frac{J (L_1 - N_1)}{R_1}$$

Digitized by Google

qui se manifeste sous forme d'un *courant continu.* Ce courant s'amortit sous la forme exponentielle, mais il peut atteindre dans les premiers instants des valeurs considérables; les courants alternatifs de court-circuit dans l'induit atteignent de ce fait, eux aussi, des valeurs considérables, puisque, en court-circuit, il y a proportionnalité entre les courants induits et le courant inducteur.

Que l'alternateur ait peu ou beaucoup de fuites, la quantité d'électricité induite dans l'inducteur pendant l'état variable reste à peu près la même, car les fuites ne font varier que N_1, petit devant L_1; mais ce qui change grandement avec l'importance des fuites, c'est l'allure de l'exponentielle qui représente le courant. Pour une même quantité d'électricité, cette exponentielle peut être plus ou moins inclinée sur l'axe des temps, suivant que la *constante de temps* du circuit inducteur est plus ou moins grande (fig. 1).

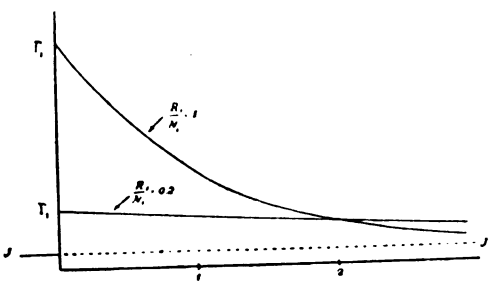


Fig. 1.

Si l'induit était ouvert, la constante de temps du circuit inducteur serait $\frac{R_1}{L_1}$. Comme l'induit est fermé sur lui-même, la constante de temps à prendre est $\frac{R_1}{N_1}$.

Le courant continu induit dans l'inducteur est donc de la forme

$$\Gamma_1 \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t}$$

(où ε est la base des logarithmes népériens) et la quantité d'électricité induite lui est reliée par la formule

$$\int_0^\infty \Gamma_1 \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} dt = \frac{J(L_1 - N_1)}{R_1},$$

Digitized by Google

d'où la valeur de ce courant au début I'_1:

$$I'_1 = J\,\frac{L_1 - N_1}{N_1}.$$

Le courant continu total dans l'inducteur, au premier instant du court-circuit, est donc

$$J + I'_1 = J\,\frac{L_1}{N},$$

et le courant efficace dans chaque phase d'induit:

$$\frac{MJ}{\sqrt{2}L_2}\cdot\frac{L_1}{N_1} = \frac{MJ}{\sqrt{2}L_2}\,\frac{L_2}{N_2} = \frac{MJ}{\sqrt{2}N_2}\ (1).$$

Nous n'avons fait aucune hypothèse sur la constitution du système inducteur; ce résultat est donc le même, qu'il y ait ou non un circuit amortisseur.

Mais le phénomène se complique de ce que, par un mécanisme analogue, des courants continus prennent naissance également dans les circuits de l'induit, qui donnent lieu encore à un courant alternatif dans l'inducteur. Il y a donc finalement, dans l'inducteur et dans l'induit, superposition de courants continus et de courants alternatifs amortis.

Les courants continus qui se développent dans les circuits d'induit n'ont pas la même importance dans tous: contrairement à celui de l'inducteur, ils dépendent dans chaque phase du moment de fermeture du court-circuit.

Supposons qu'il s'agisse d'un alternateur diphasé et que le court-circuit soit produit juste au moment où le flux est maximum dans la phase A, et, par conséquent, nul dans la phase B. Il ne se produira pas de courant continu dans celle-ci; au contraire la quantité d'électricité induite dans la phase A aura la plus grande valeur possible.

Le flux dans cette phase variant de $\frac{MJ}{n_2}$ à zéro et sa résistance étant R_2, la quantité d'électricité induite y sera:

$$\frac{MJ}{R_2}.$$

(1) Par suite de l'égalité $\frac{L_1}{N_1} = \frac{L_2}{N_2}$. Voir note annexée n. 1.

Digitized by Google

Elle donnera lieu à un courant continu de la forme:

$$\Gamma_2 \varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t},$$

dont la valeur initiale Γ_2 se déduira comme précédemment de:

$$\int_0^\infty \Gamma_2 \varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t} dt = \frac{MJ}{R_2}$$

et sera:

$$\Gamma_2 = \frac{MJ}{N_2}.$$

Le courant instantané dans la phase A sera ainsi de la forme:

$$i_2 = \frac{MJ}{N_2}\left[\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t} - \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1}t}\cos\omega t\right] + \frac{MJ}{L_2}\cos\omega t$$

et celui dans la phase B:

$$i_2 = \frac{MJ}{N_2}\varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1}t}\sin\omega t - \frac{MJ}{L_2}\sin\omega t.$$

(Le dernier terme de chaque expression y représente le courant de court-circuit permanent.)

Mais nous avons fait en passant une hypothèse sur laquelle il est nécessaire d'attirer l'attention: en admettant pour la constante de temps d'un des circuits d'induit $\frac{R_2}{N_2}$ nous avons supposé implicitement que le système inducteur est muni d'un circuit amortisseur; autrement N_2 ne serait pas constant et la forme du phénomène serait un peu plus compliquée, ainsi qu'on verra dans la note annexée n° 4. Restons-en là pour le moment et voyons ce que c'est le courant inducteur.

Le courant continu dans la phase A:

$$\frac{MJ}{N_2}\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}$$

développe dans le circuit inducteur une f. é. m. Nous n'en retiendrons que la partie la plus importante:

Digitized by Google

$$\frac{MJ}{N_2}\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}.\omega M\sin\omega t$$

qui donne un courant (analogue au courant de court-circuit ordinaire)

$$-\frac{MJ}{N_2}\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}.\frac{M}{L_1}\cos\omega t=-\frac{L_1-N_1}{N_1}J.\varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1}t}\cos\omega t,$$

en sorte que le courant inducteur instantané total est:

$$i_1=J\left[1+\frac{L_1-N_1}{N_1}\left(\varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1}t}-\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}\cos\omega t\right)\right].$$

J'ai dit tout à l'heure que le raisonnement suppose un amortisseur dans l'inducteur. On verra par la comparaison des notes annexées n^{os} 4 et 5, dans lesquelles sont traités complètement les deux cas, sans et avec amortisseur, que sans amortisseur la constante de temps des circuits induits, au lieu d'être $\frac{R_2}{N_2}$, est sensiblement $\frac{R_2}{2N_2}$; il en résulta quelques changements des surintensités et de leurs durées, sur lesquels je n'insiste pas.

Lorsque le court-circuit est produit à un autre moment de la période, l'allure de ces courants d'induit change, puisque du courant continu est induit dans les deux phases, mais celle du courant inducteur ne change pas.

Je pourrais reproduire, à l'appui des formules établies dans les notes 4 et 5, un assez grand nombre d'oscillogrammes expérimentaux qui ont été publiés ou que l'on m'a communiqués. Mais étant donné l'accord entre l'expérience et la théorie, je

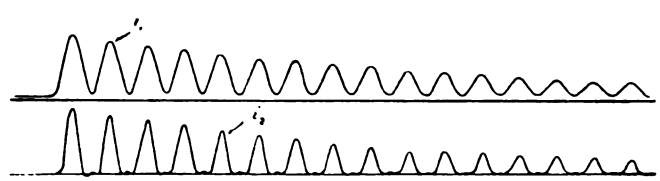


Fig. 2.

préfère donner ici, en figures 2 et 3, des courbes théoriques, qui sont plus caractéristiques que des courbes expérimentales,

Digitized by Google

parce qu'elles correspondent aux cas extrêmes sans et avec amortisseur, tandis que celles-ci sont généralement obtenues avec un amortissement imparfait.

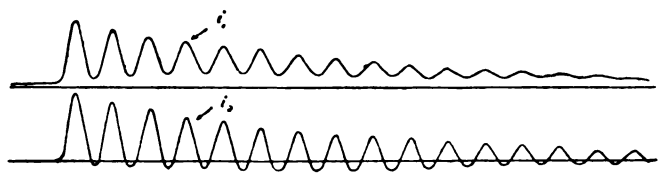


Fig. 3.

Pour établir ces courbes on a supposé le rapport $\frac{L_1}{N_1} = 10$, $\frac{R_1}{N_1} = 5$ et $\frac{R_2}{N_2} = 10$, ce qui correspond à un turbo-alternateur de grandes dimensions. La figure 2 suppose l'absence, la figure 3 la présence d'un amortisseur. On n'a figuré qu'un des deux courants induits, en supposant tout le flux dans le circuit correspondant au moment du court-circuit.

Je dis que l'accord entre la théorie et l'expérience est complet. On trouve en effet sur les oscillogrammes des valeurs des surintensités et constantes de temps qui correspondent bien à celles qu'on peut raisonnablement attribuer aux machines ayant servi aux expériences. Il faut nécessairement, dans les expressions des inductances, tenir compte de la self-inductance de l'excitatrice, qui doit entrer dans L_1.

Les constantes de temps de l'inducteur et de l'induit ne sont pas les mêmes. Il y a toujours plus de fil sur l'inducteur que sur l'induit; or, comme la résistance ne croît que comme le nombre de spires, tandis que *tous les coefficients d'inductance* croissent au moins comme le carré du nombre de spires, on doit avoir nécessairement $\frac{R_1}{N_1} < \frac{R_2}{N_2}$. Dans l'inducteur le courant alternatif doit s'amortir plus vite que le courant continu, et ce doit être le contraire dans l'induit. C'est bien en effet ce que confirme l'expérience.

Enfin, on trouve bien sur certains oscillogrammes, pour l'induit, le courant de fréquence double de la fréquence normale, qui indique l'absence d'amortisseur ou la présence d'un amortissement imparfait.

On constatera qu'il y a assez peu de différence entre l'exposé physique réduit que j'ai fait ici et le calcul complet pour qu'on

Digitized by Google

se contente en pratique du premier qui a l'avantage d'une compréhension facile.

Tirons maintenant de ceci des conclusions pratiques.

Il convient d'envisager la valeur des surintensités et leur durée.

Dans l'inducteur se développe une surintensité continue:

$$J \cdot \frac{L_1}{N_1},$$

et une surintensité alternative ayant presque cette valeur comme maximum.

Le rapport $\frac{L_1}{N_1}$ peut atteindre 10 pour un turbo-alternateur. L'intensité dans l'inducteur atteint donc momentanément 20 fois l'intensité d'excitation normale J.

Dans l'induit l'intensité efficace atteint 10 fois le courant de court-circuit normal, lequel peut être déjà 2 ou 3 fois le courant de pleine charge. A ce courant alternatif se superpose un courant continu qui dépend du moment de fermeture et peut atteindre en valeur le maximum du courant alternatif.

Dans un alternateur volant ces surintensités sont bien moindres, parce que le rapport $\frac{L_1}{N_1}$ n'atteint que 3 ou 4 au plus.

Quant aux durées il faut d'abord s'expliquer sur ce qu'on entend par là. On pourra par exemple appeler durée le temps t_1 nécessaire pour que la surintensité soit réduite au $\frac{1}{10}$ de sa valeur initiale. Il faut pour cela que l'exposant de l'exponentielle ait pour valeur 2, 3, c'est-à-dire:

$$\frac{R_1}{N_1} t_1 = 2{,}3$$

s'il s'agit de la surintensité continue dans l'inducteur et alternative dans l'induit, qui est celle qui dure le plus.

N_1 étant plus grand dans un alternateur volant que dans un turbo-alternateur (pour un même L_1), il s'ensuit que la durée serait plus grande dans le " volant „ si sa résistance R_1 était la même. Mais pour des raisons analogues à celles qui font la petitesse de N_1, la résistance dans le " turbo „ est très petite aussi, en sorte que la durée y est plus grande aussi.

En fait, la durée de la surintensité continue dans l'inducteur,

Digitized by Google

définie comme ci-dessus, est de 1, 2 ou 3 secondes pour un turbo-alternateur; la durée de la surintensité alternative, 2 ou 3 fois moindre. Celle-ci se rapproche d'autant plus de la première que la quantité de cuivre dans l'induit se rapproche plus de celle de l'inducteur, autrement dit que la réaction d'induit est plus grande.

Les conséquences de ces surintensités sont déjà trop connues, hélas! Elles durent trop peu de temps pour que l'échauffement provoqué soit dangereux, mais les effets mécaniques en sont parfois désastreux.

Sous l'influence de ces énormes courants, les parties latérales des enroulements sont soumises à des efforts énormes qui les déforment et provoquent des contacts entre fils et à la masse, à la suite desquels des coups de feu se produisent. Les constructeurs ont ainsi été amenés à prendre des dispositions spéciales et nouvelles pour l'amarrage des conducteurs des enroulements en dehors des encoches, sur lesquelles je n'insisterai pas.

La grande puissance mécanique absorbée momentanément en effet Joule n'est pas non plus sans danger si certaines parties mécaniques ne sont pas très largement établies.

Enfin il en resulte souvent des détériorations des isolants dans l'inducteur par surtension du fait de la self-inductance de l'excitatrice. Il est nécessaire de bien préciser ce point; si l'excitatrice n'avait aucune self-inductance, il n'y aurait aucune surtension dans l'inducteur, quelle que soit la grandeur des courants, pas plus qu'il n'y a de tension dans le secondaire d'un transformateur en court-circuit, quelle qu'y soit l'importance du courant.

Supposons que la self-inductance de l'excitatrice soit, pour fixer les idées, le quart de l'inductance des fuites totales N_1; sa réactance pour le courant alternatif de l'inducteur est $\frac{1}{4}\omega N_1$. La valeur efficace de ce courant alternatif, dans les premiers instants est sensiblement $\frac{J}{\sqrt{2}}\frac{L_1}{N_1}$ $\left(\text{exactement } \frac{J}{\sqrt{2}}\frac{L_1 - N_1}{N_1}\right)$. La tension efficace aux bornes de l'excitatrice et de l'inducteur est donc

$$\frac{1}{4\sqrt{2}} \cdot \omega L_1 J,$$

c'est-à-dire $\frac{1}{6}$ environ de la tension que l'on aurait aux bornes

Digitized by Google

d'une bobine ayant même self-inductance que la self-inductance *totale* de l'inducteur L_1 et dans laquelle on ferait passer un courant efficace J.

Cela représente évidemment des milliers de volts pour un inducteur excité sous 100 volts. Il faut donc que l'inducteur et l'excitatrice soient isolés pour des tensions incomparablement plus grandes que celle du fonctionnement normal.

Pour réduire les surintensités de court-circuit, il y a évidemment avantage à augmenter les fuites de l'alternateur, dans l'inducteur comme dans l'induit, contrairement à ce qu'on s'est appliqué à faire jusqu'ici pour les alternateurs. Cela n'empêche pas d'ailleurs de prendre les précautions indiquées par les considérations précédentes.

Comme palliatif aux surintensités, pour les alternateurs existants, on a, comme il fallait s'y attendre, proposé les bobines de self-induction. Elles peuvent être appliquées théoriquement dans l'inducteur comme dans l'induit. L'augmentation de L_1, aussi bien que celle de L_2, a pour effet d'augmenter N_1 et N_2, comme il résulte des formules

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \quad , \quad N_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}.$$

Dans l'inducteur, il n'y faut pas songer pratiquement. Outre que cela obligerait à faire l'excitation sous une tension plus élevée, pour fournir la chute ohmique de la bobine de self, cela provoquerait des surtensions considérables, lors des courts-circuits, aux bornes de l'excitatrice et de l'inducteur, comme je l'expliquais tout à l'heure.

L'application de bobines de self dans les circuits de l'induit ne présente pas autant de danger, mais il ne faut pas oublier que, dans le fonctionnement normal, ces bobines absorberont une tension importante en quadrature avec le courant débité par l'alternateur, ce qui obligera celui-ci à fournir, en charge, une tension supérieure de 15 à 30 % à la tension pour laquelle il a été prévu.

Il ne faut pas se dissimuler non plus que le prix d'acquisition de ces bobines n'est pas négligeable, étant donnée leur puissance apparente.

Digitized by Google

III. — **Court-circuit brusque sur une phase.**

Avant d'aborder l'étude de l'état variable qui suit la mise en court-circuit brusque d'une phase d'un alternateur, il est nécessaire de dire quelques mots du régime permanent en court-circuit monophasé.

Cette question est en effet assez peu connue. On peut, en première approximation, dire que, comme dans l'alternateur polyphasé, le courant de court-circuit efficace a pour valeur

$$I_{2cc} = \frac{E_2}{\omega L_2}.$$

Mais si l'on veut regarder les choses de plus près, elles sont plus complexes: les inductances de fuites sont, en effet, ainsi que nous avons vu plus haut, des fonctions du temps, au lieu d'être des constantes; il s'ensuit que, dans l'inducteur et dans l'induit, des harmoniques prennent naissance en nombre infini. On peut se proposer de traiter le problème sous sa forme complète, et cela a été fait plusieurs fois. J'ai moi-même montré dans " La Lumière électrique „ de 1893 que pour une charge quelconque, et par conséquent en court-circuit aussi, le courant inducteur contient tous les termes pairs de la série de Fourier et le courant induit tous les termes impairs, et donné les expressions complètes de ces courants (sans amortisseur dans l'inducteur).

Pour le sujet que nous avons en vue aujourd'hui on peut procéder par simplification en négligeant les résistances des enroulements; on arrive ainsi à se faire une idée beaucoup plus nette de ce qui se passe en évitant les développements en série. C'est ce qui est fait dans les notes annexées n. 6 et 7, dans la première pour l'alternateur sans amortisseur, dans la deuxième pour l'alternateur avec amortisseur.

Les figures 4 et 5 donnent les courbes des valeurs instantanées des diverses grandeurs en jeu dans ces deux cas. Ce qui frappe immédiatement quand on compare ces deux figures, c'est la disparition des harmoniques lorsqu'il y a un circuit amortisseur: les circuits d'induit ne contiennent plus, comme f. é. m. ou courant, que le terme en ωt; le circuit inducteur et le circuit amortisseur ne contiennent plus que le terme en $2\omega t$.

Digitized by Google

Le courant efficace dans la phase en court-circuit est toujours plus grand que dans l'hypothèse où le courant inducteur est

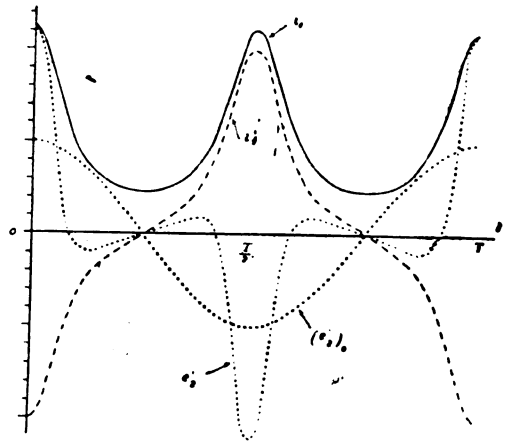


Fig. 4.

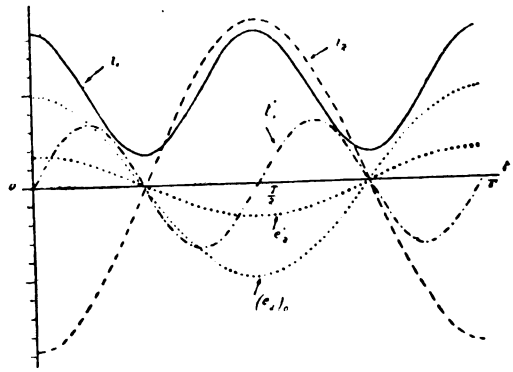


Fig. 5.

i_1, Courant inducteur instantané;
i_1', Courant amortisseur instantané;
i_2, Courant de court-circuit instantané;
e_2', Tension instantanée dans la phase ouverte;
$e_2'_o$, Tension instantanée à vide.

constant, c'est-à-dire plus grand que la valeur I_{2cc} posée plus haut. Sans amortisseur il est d'autant plus grand que les fuites sont plus petites; il est compris entre 1,5 fois et 2 fois I_{2cc} pour les valeurs pratiques du rapport $\frac{L_1}{N_1}$. Avec amortisseur il est très

Digitized by Google

voisin de 2 fois I_{2cc}. C'est ce qu'on admet généralement dans le calcul industriel des alternateurs, mais on voit ici ce que cela suppose et qu'on passe généralement sous silence.

Quant à la tension dans la phase restée ouverte, on voit combien le résultat dépend des circonstances, puisque, avec un amortisseur, les valeurs maxima et efficace de cette tension sont toujours plus petites que celles obtenues avec les deux phases ouvertes, tandis que sans amortisseur la valeur efficace de cette tension peut être plus grande ou plus petite, et la valeur maxima est toujours plus grande.

C'est surtout en vue de cette tension dans la phase ouverte que j'ai cru utile d'entrer dans ces détails du court-circuit monophasé permanent. On comprendra dès maintenant l'importance de ce point pour l'étude de l'état variable, la surintensité continue dans l'inducteur pouvant provoquer surtension dans la phase restée ouverte. Il valait donc la peine qu'on s'y arrêtat un peu.

Les résultats des calculs des notes 6 et 7 ne sont certainement qu'approchés, puisqu'on néglige les résistances devant les réactances, tout en n'étant que particuliers au cas où les coefficients de mutuelle inductance sont sinusoïdaux, ce qui n'est pas toujours complètement réalisé en pratique. Il ne faudrait donc pas avoir la prétention d'utiliser ces formules pour calculer *exactement* les diverses grandeurs en jeu ; mais je pense que, comme indication générale sur le sens des phénomènes et sur la possibilité de certaines réalisations, ils peuvent être utilisés.

La plus grosse difficulté, surtout en ce qui concerne la tension dans la phase ouverte, est certainement de discerner, pour un alternateur donné, s'il faut le considérer comme étant sans ou avec amortisseur, puisque généralement il y a un amortissement plus ou moins imparfait.

Passons maintenant à l'état variable.

Je n'ai pas besoin de dire que l'étude en est très pénible quand il n'y a pas d'amortisseur; on la trouvera résumée dans la note n. 8; celle de l'alternateur avec amortisseur dans la note n. 9.

Sans amortisseur, les constantes de temps sont de la forme singulière:

$$\frac{R}{\sqrt{LN}},$$

et le facteur de surintensité de la forme $\sqrt{\frac{L}{N}}$.

Digitized by Google

Dans l'un et l'autre cas, la courbe du courant inducteur change avec l'époque de fermeture du court-circuit. Suivant cette époque, il y a en effet plus ou moins de courant continu induit dans le circuit fermée de l'induit, et par conséquent plus ou moins de courant alternatif dans l'inducteur.

Aussi ai-je dû présenter, dans les figures 6 à 9, les courbes des courants inducteur et induit, non seulement avec et sans amortisseur, mais dans les deux cas extrêmes où le court-circuit est fait quand le flux $\mathfrak{F}_2$ est nul et quand il est maximum dans la phase court-circuitée.

Les figures sont donc établies :

Fig. 6 sans amortisseur, $\mathfrak{F}_2$ maximum.
Fig. 7 sans amortisseur, $\mathfrak{F}_2$ nul.
Fig. 8 avec amortisseur, $\mathfrak{F}_2$ maximum.
Fig. 9 avec amortisseur, $\mathfrak{F}_2$ nul.

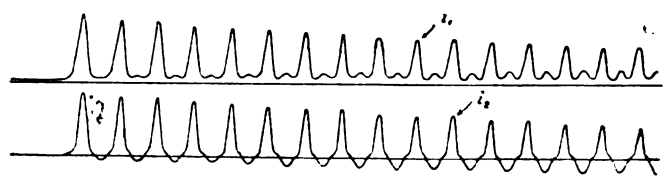


Fig. 6.

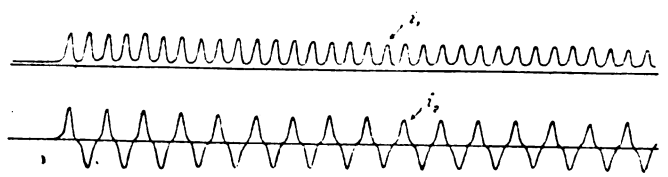


Fig. 7.

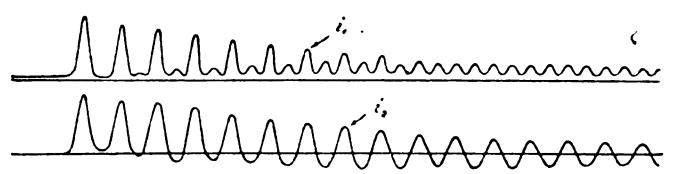


Fig. 8.

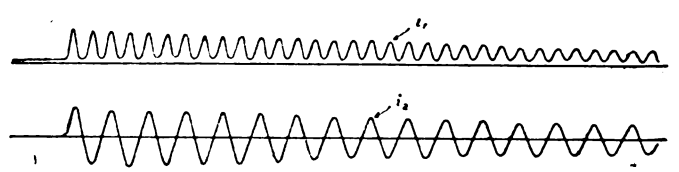


Fig. 9.

Digitized by Google

Pour que la comparaison soit facile, on a évidemment admis pour toutes ces courbes le même rapport $\frac{L_1}{N_1} = 10$, et les mêmes constantes de temps $\frac{R_1}{N_1} = 5$, $\frac{R_2}{N_2} = 10$, que lors du court-circuit diphase.

Ce qui frappe alors, c'est la durée bien plus grande de l'état variable dans le court-circuit monophasé.

Ces courbes ressemblent encore, à s'y méprendre, à certains oscillogrammes expérimentaux qui ont été publiés. Il me semble inutile de disserter plus longuement à leur sujet.

La conclusion la plus importante à tirer de cette partie de notre étude théorique concerne la tension dans la phase restée ouverte ; je n'en ai malheureusement pas de confirmation expérimentale, je veux dire oscillographique, mais de fortes présomptions de vérité résultant de descriptions d'accidents.

La théorie indique qu'avec un amortisseur, la tension maxima dans la phase ouverte, qui est ωMJ avant le court-circuit, diminue constamment pendant l'état variable, et qu'au contraire, sans amortisseur, elle peut atteindre des valeurs considérablement plus grandes. S'il n'y avait pas saturation magnétique, pour un turbo-alternateur, cette tension maxima pourrait atteindre de 10 à 20 fois la tension maxima à vide, suivant le moment du court-circuit.

Cette différence semble, au premier abord, presque paradoxale; elle s'explique très bien par l'influence du courant dans l'amortisseur qui est très grand, lui aussi, comme le courant inducteur. Les formules de la note n. 9 montrent clairement que les courants i_1 et i'_1 induisent dans la phase ouverte deux surtensions, égales et contraires, qui s'annulent.

Pratiquement, la saturation magnétique d'une part, la présence d'un amortissement plus ou moins imparfait d'autre part, ont certainement pour effet de réduire la surtension dans la phase ouverte, même quand il n'y a pas d'amortisseur. Cette surtension peut encore néanmoins être assez grande : je n'en veux pour preuve que le grand nombre de coups de feu qui se sont produits sur phases ouvertes lors de courts-circuits monophasés en ligne.

Digitized by Google

IV. — **Court-circuits partiels.**

Il est évident que si, pour une raison quelconque, un court-circuit se produit dans une portion seulement de l'enroulement induit, sur une bobine quand il y en a plusieurs, ou même sur une fraction de bobine, il en résulte encore des surintensités continues et alternatives pendant l'état variable, mais de moindre importance.

Il n'est pas inutile de faire remarquer que ces courts-circuits *partiels*, aussi bien pendant l'état variable qu'en régime établi, peuvent provoquer des surtensions dangereuses dans l'inducteur.

Nous avons vu précédemment qu'à cause de la self-inductance de l'excitatrice, un court-circuit sur l'ensemble d'une phase, ou de deux, sur la ligne par exemple, peut provoquer des tensions alternatives élevées aux bornes extrêmes de l'inducteur et de l'excitatrice. Mais, ainsi que je l'ai déjà dit, ces surtensions ne résultent que de cette self-inductance de l'excitatrice; avec une source d'excitation sans self-inductance il n'y aurait rien.

Au contraire, des courts circuits partiels, dans une machine multipolaire, peuvent donner lieu à des surtensions dans l'inducteur, en dehors de toute self-inductance dans la source d'excitation. Une f. é. m., aussi élevée qu'on voudra, en court circuit n'est pas dangereuse; au contraire deux f. é. m. égales et contraires dans un circuit, qui ne donnent pas lieu à un courant de circulation, peuvent soumettre les isolants à des tensions pour lesquelles ils ne sont pas prévus; de même deux f. é. m. inégales et contraires donnent lieu à un courant de circulation résultant de la différence et à une tension entre fils par la masse, qui peut être funeste.

Par exemple, soit un inducteur comportant 4 bobines en série. Si les 4 bobines sont chacune le siège d'une f. é. m. de 1000 volts, il n'y aura qu'un courant de circulation si les 4 f. é. m. sont de même sens. Si 2 des f. é. m. dans 2 bobines successives sont de sens contraire à celles des deux autres, il n'y aura pas de courant de circulation, mais une différence de potentiel entre certains fils, par la masse, de 2000 volts. Si 3 des f. é. m. dans 3 bobines successives sont de sens contraire à la quatrième, il y aura un courant de circulation correspondant à 2000 volts et une différence de potentiel de 1000 volts entre certains fils par la masse. Etc... etc...

Digitized by Google

Or, ceci peut se produire de plusieurs façons, par des courts-circuits partiels dans l'induit; j'en signalerai au moins deux.

1° Un alternateur diphase marche en parallèle avec un autre; un court-circuit se déclare dans une bobine d'une phase. Cette bobine devient le siège d'un courant de court circuit, donc en quadrature en retard. Mais pour l'ensemble de la phase considérée, la f. é. m. a diminué; elle devient le siège d'un courant en quadrature en avance que fournit l'autre alternateur. La machine ne fonctionne plus en polyphasé; l'inducteur est le siège de deux f. é. m. en $2\omega t$ produites dans des bobines différentes, et de sens contraire, puisque le courant déwatté est de sens contraire dans des bobines différentes d'une même phase.

2° Un alternateur diphase fonctionne seul; deux courts-circuits se produisent en même temps, l'un sur une bobine de la phase sinus, l'autre sur une bobine *d'un autre pôle* de la phase cosinus. Résultat: encore deux f. é. m. en $2\omega t$ sont développées dans deux bobines différentes de l'inducteur, et elles sont de sens contraire. En effet, si les deux bobines en court-circuit étaient sur le même pôle, la somme des deux f. é. m. en $2\omega t$ serait nulle; elles sont donc bien de sens contraire.

On trouverait probablement encore d'autres cas possibles en cherchant bien.

Et il ne faudrait pas croire que les f. é. m. ainsi développées dans l'inducteur par un court-circuit partiel soient petites: on calcule aisément qu'elles atteignent plusieurs milliers de volts dans un turbo-alternateur.

Conclusion.

La variété des accidents qui peuvent se produire avec les turbo-alternateurs est aussi grande que les conséquences en sont désastreuses. Le plus souvent il s'en produit plusieurs simultanément ou successivement.

Généralement, cela commence par un court-circuit en ligne sur une phase, qui produit des détériorations par surtensions dans la phase ouverte ou dans l'inducteur, ou par déformation des connexions latérales des enroulements. Lorsque la tension remonte, les parties abîmées cèdent et provoquent de nouveaux courts-circuits totaux ou partiels qui produisent de nouvelles détériorations. Et le combat cesse faute de combattants!

Digitized by Google

Il est certain que l'impression d'insécurité des turbo-alternateurs fut grande il y a deux ou trois ans, et qu'elle n'est pas encore effacée. Le président du conseil d'administration d'une grande société d'exploitation française, qui possède un assez grand nombre de turbo-alternateurs, ne disait-il pas à ce moment, devant une société technique nombreuse, que pour être certain d'avoir un turbo-alternateur en service il fallait en acheter trois?

Heureusement, cette impression d'insécurité s'efface tous les jours, et les accidents se font de plus en plus rares. Par l'emploi de procédés spéciaux de fixation des enroulements, par le renforcement des isolants, on est arrivé à obtenir de ces machines qu'elles supportent bien mieux les conséquences des états anormaux passagers des réseaux.

***

Je m'excuse de la longueur de cette communication. Je l'ai faite aussi courte qu'il était possible sans laisser dans l'obscurité des choses importantes. Le lecteur qui pourra l'étudier à fond se rendra compte que cette affirmation n'est pas de pure forme.

Je dois des remerciements, pour l'assistance intelligente et dévouée qu'il m'a prêtée dans l'accomplissement des calculs que comporte cette étude, à mon élève et collaborateur Monsieur P. Noël.

Digitized by Google

NOTES ANNEXÉES

N° 1.

Sur les coefficients d'inductance des 2 circuits d'un transformateur.

L_1 et L_2 sont les coefficients de self-inductance proprement dits, définis comme si chaque circuit était seul :

$$L_1 = n_1 \mathcal{F}_1 \qquad L_2 = n_2 \mathcal{F}_2$$

n_1 et n_2 étant les nombres de spires, $\mathcal{F}_1$ le flux qu'embrasse le circuit 1 lorsqu'il est seul parcouru par un courant de 10 ampères, $\mathcal{F}_2$ le flux qu'embrasse le circuit 2 lorsqu'il est seul parcouru par un courant de 10 ampères.

D'autre part M est défini par

$$M = n_2 k_1 \mathcal{F}_1 = n_1 k_2 \mathcal{F}_2 ,$$

$k_1 \mathcal{F}_1$ étant la portion du flux $\mathcal{F}_1$ embrassée par le circuit 2 quand le circuit 1 est parcouru par un courant de 10 ampères et $k_2 \mathcal{F}_2$ étant la portion du flux $\mathcal{F}_2$ embrassée par le circuit 1 quand le circuit 2 est parcouru par un courant de 10 ampères.

D'où les self-inductances de fuites :

$$\mathfrak{L}_1 = L_1 - n_1 k_1 \mathcal{F}_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M$$

$$\mathfrak{L}_2 = L_2 - n_2 k_2 \mathcal{F}_2 = L_2 - \frac{n_2}{n_1} M .$$

Évidemment on a

$$M^2 = (L_1 - \mathfrak{L}_1)(L_2 - \mathfrak{L}_2).$$

Si l'on affecte artificiellement toutes les fuites au circuit 1 en lui attribuant une inductance des fuites totales N_1, on aura de même :

$$M^2 = (L_1 - N_1) L_2$$

Digitized by Google

d'où

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2}.$$

On peut de même affecter toutes les fuites au circuit 2 en lui attribuant une inductance des fuites totales N_2:

$$N_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}.$$

On sera dans l'un ou l'autre de ces cas en alimentant l'un des circuits lorsque l'autre est fermé sur lui-même. Soit par exemple le secondaire en court-circuit, en négligeant les résistances, ce qu'on peut faire pratiquement; on a dans ce circuit:

$$L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0$$

d'où

$$i_2 = - i_1 \frac{M}{L_2}$$

et dans le primaire la f. é. m.

$$e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right) \frac{di_1}{dt} = N_1 \frac{di_1}{dt},$$

ce qui veut dire que, quelle que soit la forme du courant, N_1 est l'inductance apparente du primaire.

J'ai dit que dans ces conditions le flux embrassé par le primaire est la somme des flux de fuites des deux circuits, bien entendu, pris dans le même sens au même instant. En effet, le flux réel dans le secondaire est nul puisqu'il est supposé sans résistance. Le secondaire reçoit donc du primaire un flux égal et contraire à son flux de fuites; par suite le primaire est le siège d'un flux égal à son flux de fuites augmenté du flux de fuites secondaire changé de signe (voir fig. 10), c'est-à-dire:

$$\frac{\mathfrak{L}_1 i_1}{n_1} - \frac{\mathfrak{L}_2 i_2}{n_2},$$

soit, en remplaçant $\mathfrak{L}_1$, $\mathfrak{L}_2$ par leurs valeurs en fonction de L_1, L_2 et M, et i_2 par sa valeur en fonction de i_1:

Digitized by Google

$$\left(L_1 - \frac{n_1}{n_2} M\right) \frac{i_1}{n_1} + \left(L_2 - \frac{n_2}{n_1} M\right) \frac{i_1}{n_2} \frac{M}{L_2} = \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right) \frac{i_1}{n_1} = \frac{N_1 i_1}{n_1}.$$

N_1 est bien ainsi l'inductance des fuites totales.

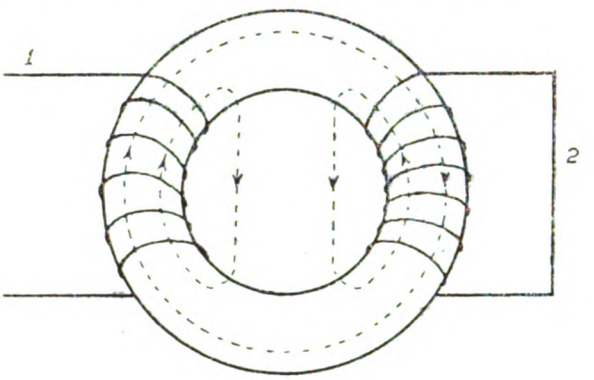


Fig. 10.

Il n'est pas inutile de remarquer que $\frac{N_1}{N_2} = \frac{L_1}{L_2} \neq \frac{n_1^2}{n_2^2}$.

N° 2.

Dans un alternateur diphasé les 3 coefficients d'inductance de l'inducteur conservent la signification qu'ils ont pour l'un des circuits d'un transformateur.

Soit (fig. 11) 1 le circuit inducteur, 2 et 2′ les deux circuits

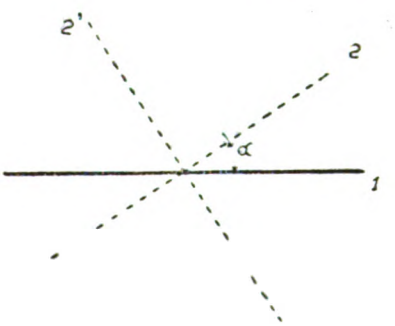


Fig. 11.

induits. Faisons passer 10 ampères dans le circuit 1, il embrasse un flux $\mathfrak{F}_1$ tel que

$$L_1 = n_1 \mathfrak{F}_1.$$

Digitized by Google

Une partie $k_1 \mathcal{F}_1$ de ce flux traverse l'ensemble des circuits 2 et 2′: la composante $k_1 \mathcal{F}_1 \cos \alpha$ traverse le circuit 2 et la composante $k_1 \mathcal{F}_1 \sin \alpha$ traverse le circuit 2′. Les mutuelles inductances sont:

$$M \cos \alpha \text{ entre 1 et 2,}$$

$$M \sin \alpha \text{ entre 1 et 2';}$$

en sorte qu'on a bien encore:

$$M = n_2 k_1 \mathcal{F}_1$$

$$\text{et } \mathfrak{L}_1 = L_1 - n_1 k_1 \mathcal{F}_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M .$$

Si l'on ferme les circuits 2 et 2′ sur eux-mêmes, en négligeant encore les résistances, on a:

$$\frac{d}{dt}(L_2 \iota_2 + M \cos \alpha \,.\, \iota_1) = 0$$

$$\frac{d}{dt}(L_2 \iota'_2 + M \sin \alpha \,.\, \iota_1) = 0$$

d'où

$$\iota_2 = - \iota_1 \frac{M \cos \alpha}{L_2} \quad ; \quad \iota'_2 = - \iota_1 \frac{M \sin \alpha}{L_2}$$

(dans lesquelles α est fonction quelconque du temps).

D'où, la f. é. m. dans le circuit 1:

$$e_1 = \frac{d}{dt}(L_1 \iota_1 + M \cos \alpha \,.\, \iota_2 + M \sin \alpha \,.\, \iota_2^1)$$

$$e_1 = \frac{d}{dt}\left(L_1 i_1 - i_1 \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2} - \iota_1 \frac{M^2 \sin^2 \alpha}{L_2}\right)$$

$$e_1 = N_1 \frac{di_1}{dt} .$$

Digitized by Google

N° 3.

La self-inductance de fuites et l'inductance des fuites totales de l'inducteur d'un alternateur monophasé sont des fonctions périodiques du temps.

La même figure 11 peut servir en supprimant par la pensée le circuit 2[1]. Faisons passer 10 ampères dans le circuit 1, il embrasse un flux $\mathcal{F}_1$ tel que

$$L_1 = n_1 \mathcal{F}_1 .$$

Quand $\alpha = 0$, une partie $k_1 \mathcal{F}_1$ de ce flux traverse 2; quand α est quelconque, une partie $k_1 \mathcal{F}_1 \cos \alpha$ de ce flux traverse 2. La self-inductance de fuites est donc:

$$\mathfrak{L}_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M \cos \alpha .$$

Fermons 2 sur lui-même.

$$\frac{d}{dt}(L_2 i_2 + M \cos \alpha \, . \, i_1) = 0$$

d'où

$$i_2 = - i_1 \frac{M \cos \alpha}{L_2}$$

et la f. é. m. dans 1:

$$e_1 = \frac{d}{dt}(L_1 i_1 + i_2 \, . \, M \cos \alpha)$$

$$e_1 = \frac{d}{dt}\left(L_1 i_1 - i_1 \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2}\right)$$

$$e_1 = \frac{d}{dt}\left[\left(L_1 - \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2}\right) i_1\right].$$

L'inductance des fuites totales est donc:

$$N_1 = L_1 - \frac{M^2 \cos^2 \alpha}{L_2} ;$$

α étant fonction du temps, L_1 et N_1 sont fonctions du temps.

Digitized by Google

N° 4.

État variable qui suit le court-circuit brusque sur les deux phases d'un alternateur diphase sans amortisseur.

Le flux dans l'inducteur passe de la valeur constante $\mathcal{F}_1$ à la valeur constante $\mathcal{F}_{1cc}$ par une exponentielle, simple si l'on néglige le $R_1 i_1$ du circuit inducteur, dentelée si l'on en tient compte; nous n'en tiendrons pas compte.

De même, dans un des circuits de l'induit, il passe, de la valeur qu'il a au moment de la fermeture, à zéro, de la même manière. Les exposants des exponentielles ne sont pas les mêmes pour l'inducteur et l'induit.

Nous appellerons:

m_{12} et m'_{12}, les coefficients de mutuelle inductance entre l'inducteur et chacun des circuits de l'induit,
i_1 , le courant instantané dans l'inducteur,
i_2 et i'_2, les courants instantanés dans les circuits d'induit,
L_1 et L_2, les self-inductances de l'inducteur et de l'induit,
$\mathcal{F}_2$ et $\mathcal{F}'_2$, les valeurs des flux dans chaque circuit d'induit au moment de la fermeture (pour $t = o$).

Nous aurons ainsi (1):

$$m_{12}\, i_1 + L_2\, i_2 = \mathcal{F}_2\, \varepsilon^{-a_2 t}$$

$$m_{12'}\, i_1 + L_2\, i_2' = \mathcal{F}'_2\, \varepsilon^{-a_2 t}$$

$$m_{12}\, i_2 + m_{12'}\, i_2' + L_1\, i_1 = \mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\, \varepsilon^{-a_1 t}.$$

Tirons i_2 et i_2' des deux premières équations et remplaçons dans la troisième. En remarquant que $m^2_{12} + m^2_{12'} = M^2$ et que $L_1 - \frac{M^2}{L_2} = N_1$, il vient

$$i_1 = \frac{1}{N_1}\left[\mathcal{F}_{1c} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\, \varepsilon^{-a_1 t} - \frac{1}{L_2}(m_{12}\, \mathcal{F}_2 + m_{12'}\, \mathcal{F}'_2)\, \varepsilon^{-a_2 t}\right].$$

En écrivant que:

$$\int_0^\infty (i_1 - J)\, dt = \frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc}}{R_1}$$

(1) Les circuits sont tous ramenés à une spire pour simplifier.

Digitized by Google

on déduit immédiatement:

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{N_1}.$$

Pour pouvoir faire varier les conditions initiales du court-circuit, nous ferons toujours celui-ci à l'époque $t = 0$, mais nous donnerons aux mutuelles inductances les formes:

$$m_{12} = M \cos \omega (t + \tau); \qquad m_{12'} = - M \sin \omega (t + \tau);$$

dans lesquelles nous pourrons donner à τ telle valeur que nous voudrons. Il en résulte:

$$\mathcal{F}_2 = MJ \cos \omega\tau \qquad \mathcal{F}_2' = - MJ \sin \omega\tau$$

et:

$$m_{12} \mathcal{F}_2 + m_{12} \mathcal{F}_2' = M^2 J \cos \omega t.$$

i_2 et i_2' peuvent être exprimés en fonction de i_1.

En écrivant que:

$$\int_0^\infty i_2 \, dt = \frac{\mathcal{F}_2}{R_2},$$

ou que:

$$\int_0^\infty i'_2 \, dt = \frac{\mathcal{F}'_2}{R_2},$$

on trouve de même:

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{2N_2} \frac{L_2 + N_2}{L_2},$$

expression plus compliquée que celle de α_1 parce que l'inducteur n'est pas polyphasé.

Finalement peuvent être exprimés i_1, i_2 et i_2', en remplaçant $\mathcal{F}_1$ et $\mathcal{F}_{1cc}$:

$$i_1 = J \left[1 + \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1} t} - \frac{L_1 - N_1}{N_1} \varepsilon^{-\frac{R_2}{2N_2} \frac{L_2 + N_2}{L_2}} \cos \omega t \right]$$

(cette expression ne contenant pas τ, la forme du courant

Digitized by Google

inducteur est indépendante de l'époque à laquelle est fait le court-circuit);

$$i_2 = -\frac{MJ}{L_2}\left[\cos\omega(t+\tau) + \frac{L_1 - N_1}{N_1}\varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1}t}\cos\omega(t+\tau) - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{2}\frac{L_1 + N_1}{N_1}\varepsilon^{-\frac{R_2}{2N_2}\frac{L_2+N_2}{N_2}}\cos\omega\tau - \frac{1}{2}\frac{L_1 - N_1}{N_1}\varepsilon^{-\frac{R_2}{2N_2}\frac{L_2+N_2}{L_2}}\cos\omega(2t+\tau)\right]$$

et une formule analogue pour i'_2, mais en sinus.

On peut en outre retenir de ces formules que, lorsque les deux parties d'une machine ne sont pas constituées toutes deux en systèmes polyphasés, la constante de temps est de la forme $\frac{R}{N}$ pour le circuit de la partie non polyphasée, et de la forme

$$\frac{R}{2N}\frac{L+N}{L},$$

ou sensiblement $\frac{R}{2N}$, pour les circuits de la partie polyphasée.

N° 5.

État variable qui suit le court-circuit brusque sur les deux phases d'un alternateur diphase avec amortisseur.

Mêmes symboles qu'à la note n. 4, avec en plus: i_1' courant instantané dans l'amortisseur $m_{1'2}$ et $m_{1'2'}$; mutuelles inductances entre l'amortisseur et les circuits d'induit, que nous poserons:

$$m_{1'2} = M\sin\omega(t+\tau) \qquad m_{1'2'} = M\cos\omega(t+\tau).$$

Les valeurs des 4 flux sont:

$$m_{12}\,i_1 + m_{1'2}\,i_1' + L_2\,i_2 = \mathfrak{F}_2\,\varepsilon^{-a_2 t}$$

$$m_{12'}\,i_1 + m_{1'2'}\,i_1' + L_2\,i_2' = \mathfrak{F}_2'\,\varepsilon^{-a_2 t}$$

$$m_{12}\,i_2 + m_{12'}\,i_2' + L_1\,i_1 = \mathfrak{F}_{1\infty} + (\mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_{1\infty})\,\varepsilon^{-a_1 t}$$

$$m_{1'2}\,i_2 + m_{1'2'}\,i_2' + L_1\,i_1' = 0.$$

Digitized by Google

(La dernière équation se rapporte à l'amortisseur).

Tirons i_2 et ι_2' des deux premières équations et remplaçons dans les deux autres, il vient:

$$i_1 = \frac{1}{N_1}\left[\mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\,\varepsilon^{-a_1 t} - \frac{1}{L_2}\,m_{12}\,\mathcal{F}_2 + m_{12'}\,\mathcal{F}_2')\,\varepsilon^{-a_2 t}\right]$$

$$\iota_1' = -\frac{1}{L_2 N_1}\left(m_{1'2}\,\mathcal{F}_2 + m_{1'2'}\,\mathcal{F}_2'\right)\varepsilon^{-a_2 t}.$$

$$i_2 = \frac{1}{L_2}\left\{\mathcal{F}_-\,\varepsilon^{-a_2 t} - \frac{1}{N_1}\left[m_{12}\,\mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\,m_{12}\,\varepsilon^{-a_1 t} - \frac{M^2}{L_2}\,\mathcal{F}_2\,\varepsilon^{-a_2 t}\right]\right\}$$

$$\iota_2' = \frac{1}{L_2}\left\{\mathcal{F}_2'\,\varepsilon^{-a_2 t} - \frac{1}{N_1}\left[m_{12'}\,\mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\,m_{12'}\,\varepsilon^{-a_1 t} - \frac{M^2}{L_2}\,\mathcal{F}_2'\,\varepsilon^{-a_2 t}\right]\right\}.$$

En écrivant que

$$\int_0^\infty (\iota_1 - J)\,dt = \frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc}}{R_1},$$

on trouve $a_1 = \frac{R_1}{N_1}$ comme dans le cas précédent.

Et en écrivant, soit

$$\int_0^\infty \iota_2\,dt = \frac{MJ\cos\omega\tau}{R_2},$$

soit

$$\int_0^\infty \iota_2'\,dt = \frac{MJ\sin\omega\tau}{R_2},$$

on trouve cette fois $a_2 = \frac{R_2}{N_2}$ (inducteur polyphasé); et finalement, en remplaçant les $\mathcal{F}$:

$$i_1 = J\left[1 + \frac{L_1 - N_1}{N_1}\,\varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1}t} - \frac{L_1 - N_1}{N_1}\,\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}\cos\omega t\right]$$

$$\iota_1' = -J\,\frac{L_1 - N_1}{N_1}\,\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}\sin\omega t$$

Digitized by Google

(expressions indépendantes de l'époque de fermeture)

$$i_2 = -\frac{MJ}{L_2}\left[\cos\omega(t+\tau) + \frac{L_1}{N_1} - \frac{N_1}{N_1}\varepsilon^{-\frac{R_1}{N_1}t}\cos\omega(t+\tau) - \right.$$
$$\left. - \frac{L_1}{N_1}\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}\cos\omega\tau\right]$$

et une formule analogue pour i'_2, mais en sinus.

Ainsi que j'ai dit au début de la note 4, les flux ne sont pas en réalité aussi simples et comprennent encore une ondulation correspondant à la production de la chute ohmique dans chaque circuit; mais si l'on veut tenir compte de ces faits, les calculs se compliquent beaucoup. Nous avons traité ces deux problèmes complètement: l'introduction des résistances a pour effet d'ajouter aux formules un certain nombre de termes dont l'importance est trop secondaire pour qu'on allonge encore ce Mémoire.

N° 6.

On se propose de trouver, pour un alternateur diphase sans circuit amortisseur, dont une des phases est en court-circuit, les formes approchées: du courant inducteur, du courant de court-circuit et de la f. é. m. dans la phase restée ouverte, *en régime permanent.*

i_1 est le courant inducteur instantané,

i_2 le courant de court-circuit instantané,

m_{12} la mutuelle inductance entre l'inducteur et la phase court-circuitée,

m'_{12} la mutuelle inductance entre l'inducteur et la phase ouverte.

La résistance de l'induit étant supposée nulle, le flux y est constamment nul; on a donc:

$$m_{12}\, i_1 + L_2\, i_2 = 0.$$

Pour la même raison, le flux dans l'inducteur $\mathfrak{F}_{1\infty}$ est constant, d'où:

$$m_{12}\, i_2 + L_1\, i_1 = \mathfrak{F}_{1\infty}\,(1).$$

---

(1) Inducteur et induit sont supposés d'une spire seulement pour simplifier.

Digitized by Google

De ces deux équations:

$$i_1 = \frac{L_2 \mathcal{F}_{1cc}}{L_1 L_2 - m^2_{12}}$$

$$i_2 = -\frac{m_{12} \mathcal{F}_{1cc}}{L_1 L_2 - m^2_{12}}$$

et la tension dans la phase ouverte

$$e_2' = -\frac{d}{dt}(m_{12}' i_1) = -L_2 \mathcal{F}_{1cc} \frac{d}{dt}\left(\frac{m_{12}'}{L_1 L_2 - m^2_{12}}\right).$$

La partie constante J du courant inducteur est

$$J = \frac{1}{T}\int_0^T i_1 \, dt = \frac{L_2 \mathcal{F}_{1cc}}{T} \int_0^T \frac{dt}{L_1 L_2 - m^2_{12}}.$$

En posant par exemple:

$$m_{12} = M \cos \omega t$$

$$m_{12}' = -M \sin \omega t,$$

J devient après intégration:

$$J = \frac{L_2 \mathcal{F}_{1cc}}{\sqrt{(L_1 L_2 - M^2) L_1 L_2}} = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{\sqrt{L_1 \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right)}} = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{\sqrt{L_1 N_1}}$$

ce qui nous donne la relation entre le flux constant dans l'inducteur et le courant continu d'excitation J,

$$F_{1cc} = J \sqrt{L_1 N_1},$$

qui permet d'exprimer i_1, i_2 et e_2' en fonction de J:

$$i_1 = \frac{J L_2 \sqrt{L_1 N_1}}{L_1 L_2 - M^2 \cos^2 \omega t} = J \frac{\sqrt{L_1 N_1}}{L_1 - (L_1 - N_1) \cos^2 \omega t}$$

$$i_2 = -\frac{J \sqrt{L_1 N_1} M \cos \omega t}{L_1 L_2 - M^2 \cos^2 \omega t} = -\frac{M}{L_2} J \frac{\sqrt{L_1 N_1} \cos \omega t}{L_1 - (L_1 - N_1) \cos^2 \omega t}$$

Digitized by Google

$$e_2' = + JL_2\sqrt{L_1 N_1}\,\frac{d}{dt}\left[\frac{M \sin \omega t}{L_1 L_2 - M^2 \cos^2 \omega t}\right] =$$

$$= - \omega MJ \sqrt{\frac{L_1}{N_1}}\,\frac{\dfrac{L_1 - N_1}{N_1}\sin^2 \omega t - 1}{\left[\dfrac{L_1 - N_1}{N_1}\sin^2 \omega t + 1\right]^2}\cos \omega t$$

ainsi que cette même force électromotrice $(e_2')_o$ quand l'alternateur est à vide

$$(e_2')_o = \omega\, MJ \cos \omega t.$$

La figure 4 montre les courbes de ces quatre grandeurs pour le cas particulier où $M^2 = 0{,}8\, L_1 L_2$, ce qui correspond à des fuites moyennes ($N_1 = 0{,}2\, L_1$).

Et ci-dessous certaines valeurs particulières.

$$(i_1)\,\max = J\sqrt{\frac{L_1}{N_1}}$$

$$(i_1)\,\min = J\sqrt{\frac{N_1}{L_1}}$$

$$I_1\,(\text{eff}) = J\sqrt{\frac{L_1 + N_1}{2\sqrt{L_1 N_1}}},\ \text{approximativement}\ \frac{J}{\sqrt{2}}\sqrt[4]{\frac{L_1}{N_1}}$$

$$(i_2)\,\max = J\sqrt{\frac{L_1}{N_1}}\,\frac{M}{L_2}.$$

$$I_2\,(\text{eff}) = \frac{MJ}{\sqrt{2}\,L_2}\sqrt[4]{\frac{L_1}{N_1}} = I_{2cc}\sqrt[4]{\frac{L_1}{N_1}}$$

$$(e_2')\,\max = \omega MJ\sqrt{\frac{L_1}{N_1}}$$

$$E_2'\,(\text{eff}) = \frac{\omega MJ}{2}\sqrt{\frac{L_1^2 + N_1^2}{L_1\sqrt{L_1 N_1}}},\ \text{approximativement}\ \frac{\omega MJ}{2}\sqrt[4]{\frac{L_1}{N_1}}$$

$$(E_1')_o\,(\text{eff}) = \frac{\omega MJ}{\sqrt{2}}.$$

Digitized by Google

D'où ces quelques conclusions :

Le courant de court-circuit efficace est toujours plus grand que celui déduit en première approximation I_{2cc}, de 1 fois $^1/_2$ à 2 fois.

Le maximum de la tension dans la phase ouverte est toujours plus grand que le maximum à vide.

La tension efficace dans la phase ouverte peut être, selon les fuites, plus grande ou plus petite que la tension efficace à vide: pour environ $N_1 < \frac{L_1}{4}$ elle est plus grande, pour $N, > \frac{L_1}{4}$ elle est plus petite.

Pour fixer les idées, si $\frac{L_1}{N_1} = 10$, la tension maxima dans la phase ouverte est 3 fois la tension maxima à vide, la tension efficace est 1,25 fois la tension efficace à vide.

N° 7.

On se propose de trouver, pour un alternateur diphase avec circuit amortisseur, dont une des phases est en court-circuit, les formes approchées : du courant inducteur, du courant dans l'amortisseur, du courant de court-circuit et de la f. é. m. dans la phase restée ouverte, *en régime permanent.*

En plus des symboles du cas précédent nous aurons :

i''_1, courant instantané dans l'amortisseur

$m'_{1'2} = M \sin \omega t$, mutuelle inductance entre l'amortisseur et la phase en court-circuit;

$m_{1'2'} = M \cos \omega t$, mutuelle inductance entre l'amortisseur et la phase ouverte.

Comme précédemment nous avons pour la phase en court-circuit :

$$m_{12} i_1 + m_{1'2} i_1' + L_2 i_2 = 0.$$

Dans l'amortisseur :

$$m_{1'2} i_2 + L_1 i_1' = 0.$$

Dans l'inducteur :

$$m_{12} i_2 + L_1 i_1 = \mathcal{E}_{1\infty}.$$

Digitized by Google

Tirant $\imath_1'$ de la 2e équation, on le substitue dans la 1e, dont on tire i_2 qu'on substitue dans la 3e, dont on tire $\imath_1$:

$$\imath_1 = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{L_1} \frac{L_1 L_2 - m^2_{1'2}}{L_1 L_2 - m^2_{1'2} - m^2_{12}} = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{L_1} \frac{L_1 L_2 - m^2_{1'2}}{L_1 L_2 - M^2}.$$

Puis de nouveau i_2:

$$\imath_2 = - \mathcal{F}_{1cc} \frac{m_{12}}{L_1 L_2 - M^2}$$

et $\imath_1'$:

$$\imath_1' = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{L_1} \frac{m_{12}\, m_{1'2}}{L_1 L_2 - M^2}.$$

On peut remarquer de suite que ces expressions ne contiennent, chacune, qu'un terme sinusoïdal, ainsi que la tension dans la phase ouverte:

$$e_2' = - \frac{d}{dt} (m_{12'}\, \imath_1 + m_{1'2'}\, \imath_1') = \frac{\omega M \mathcal{F}_{1cc}}{L_1} \cos \omega t.$$

La partie constante J du courant inducteur est:

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T \imath_1\, dt = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{T L_2 (L_1 L_2 - M^2)} \int_0^T (\imath_1\, \imath_2 - m^2_{1'2})\, dt$$

$$J = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{2L_1} \frac{2L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2 - M^2} = \frac{\mathcal{F}_{1cc}}{2L_1} \frac{L_1 + N_1}{N_1}$$

ce qui permet de remplacer $\mathcal{F}_{1cc}$ par J dans les formules:

$$i_1 = J \left[1 + \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \cos 2\, \omega t\right]$$

$$i_2 = - \frac{2MJ}{L_2 + N_2} \cos \omega t$$

$$\imath_1' = J \cdot \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1} \sin 2\, \omega t$$

$$e_2' = 2\, \omega\, M\, J \frac{N_1}{L_1 + N_1} \cos \omega t.$$

Digitized by Google

Cette f. é. m., quand l'alternateur est à vide, est:

$$(e_2')_0 = \omega MJ \cos \omega t.$$

Pour qu'on puisse comparer avec le cas de l'alternateur sans amortisseur, nous avons porté en figure 5 les courbes de ces cinq grandeurs pour le cas particulier où $M^2 = 0{,}8\, L_1 L_2$, fuites moyennes ($N_1 = 0{,}2\, L_1$).

Ci-après quelques valeurs particulières:

$$(i_1)_{max} = J \frac{2L_1}{L_1 + N_1}$$

$$(i_1)_{min} = J \frac{2N_1}{L_1 + N_1}$$

$$I_1 \text{ (eff.)} = J \sqrt{1 + \frac{1}{2} \frac{(L_1 - N_1)^2}{(L_1 + N_1)^2}}$$

$$I_1' \text{ (eff.)} = \frac{J}{\sqrt{2}} \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1}$$

$$(i_2)_{max} = \frac{2\,M\,J}{L_2 + N_2}$$

$$I_2 \text{ (eff.)} = \frac{\sqrt{2}\,M\,J}{L_2 + N_2};$$

approximativement $2\, I_{2cc}$

$$(e_2')_{max} = 2\,\omega\,M\,J \frac{N_1}{L_1 + N_1}$$

$$E_2' \text{ (eff.)} = \sqrt{2}\,\omega\,M\,J \frac{N_1}{L_1 + N_1}$$

$$(E_2')_0 \text{ (eff.)} = \frac{\omega\,M\,J}{\sqrt{2}}.$$

D'où ces quelques conclusions:

Le courant de court-circuit efficace est environ 2 fois celui de première approximation I_{2cc}.

Digitized by Google

Les valeurs maxima et efficace de la tension dans la phase ouverte sont toujours plus petites qu'à vide, et d'autant plus petites que les fuites sont plus faibles, contrairement à ce qu'indique le calcul sans amortisseur.

Pour fixer les idées, si $\frac{L_1}{N_1} = 10$, les tensions maxima et efficace dans la phase ouverte ne valent que 0,18 des tensions maxima et efficace à vide.

N° 8.

État variable qui suit le court-circuit brusque sur une phase d'un alternateur diphase sans amortisseur.

Les symboles sont les mêmes que dans la note 4. Il n'y a que deux circuits fermés (1):

$$m_{12}\, i_2 + L_1\, i_1 = \mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\, \varepsilon^{-a_1 t}\,.$$

$$m_{12}\, i_1 + L_2\, i_2 = \mathcal{F}_2\, \varepsilon^{-a_2 t}.$$

Tirons i_2 de la seconde équation et remplaçons dans la première, il vient:

$$i_1 = \frac{1}{L_1 - \frac{m_{12}^2}{L_2}} \left[\mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\varepsilon^{-a_1 t} - \frac{m_{12}}{L_2}\, \mathcal{F}_2\, \varepsilon^{-a_2 t}\right].$$

Il faut encore chercher la quantité d'électricité correspondant à ce courant, diminué de J. C'est plus complexe que dans les cas précédents. Pour faire varier les conditions initiales, nous poserons:

$$m_{12} = M \cos \omega\,(t + \tau).$$

Développons le quotient en avant de la parenthèse de i_1:

$$\frac{1}{L_1 - \frac{m_{12}^2}{L_2}} = \frac{L_2}{L_1 L_2 - \frac{M^2}{2} - \frac{M^2}{2} \cos 2\,\omega\,(t + \tau)} =$$

$$= \frac{L_2}{L_1 L_2 - \frac{M^2}{2}} \left[1 + \frac{M^2}{2 L_1 L_2 - M^2} \cos 2\omega(t+\tau) + \left(\frac{M^2}{2 L_1 L_2 - M^2}\right)^2 \cos^2 \omega(t+\tau) + \ldots\right].$$

(1) Les circuits sont toujours supposés d'une spire pour simplifier.

Digitized by Google

Remarquons alors que, puisque le développement ne contient pas de termes en cos $\omega(t+\tau)$, le terme qui contient m_{12} dans la parenthèse de i_1 ne donnera pas de quantité d'électricité, et que finalement la partie constante seule de ce développement donnera un résultat dans l'intégration de la quantité d'électricité.

Or la partie constante de ce développement est une série convergente :

En effet,

$$\frac{M^2}{2L_1 L_2 - M^2} = \frac{\frac{M^2}{L_2}}{2L_1 - \frac{M^2}{L_2}} = \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1},$$

quantité plus petite que l'unité.

La partie constante du développement est:

$$\frac{2}{L_1 + N_1}\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1}\right)^2 + \frac{3}{8}\left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1}\right)^4 + \frac{5}{16}\left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1}\right)^6 + \ldots\right]$$

(les puissances paires du cosinus donnent seules quelque chose).

La parenthèse est justement le développement de:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1}\right)^2}} = \frac{L_1 + N_1}{2\sqrt{L_1 N_1}},$$

en sorte que, dans l'intégration de $i_1 dt$, la partie

$$\frac{1}{\sqrt{L_1 N_1}}\left[\mathfrak{F}_{1\infty} + (\mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_{1\infty})\,\varepsilon^{-\alpha_1 t}\right]$$

donnera seule un résultat.

En écrivant:

$$\int_0^\infty (i_1 - J)\,dt = \frac{\mathfrak{F}_1 - \mathfrak{F}_{1\infty}}{R_1},$$

on a finalement:

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{\sqrt{L_1 N_1}}.$$

Digitized by Google

On fera de même pour i_2:

$$i_2 = \frac{\mathcal{F}_2}{L_2}\,\varepsilon^{-\alpha_2 t} - m_{12}\,\frac{\mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\,\varepsilon^{-\alpha_1 t} - \dfrac{M_{12}}{L_2}\,\mathcal{F}_2\,\varepsilon^{-\alpha_2 t}}{L_1 L_2 - m_{12}^2}\,.$$

Dans l'intégration de la quantité d'électricité, seuls les termes en $\mathcal{F}_2$ donneront quelque chose, de sorte que la partie:

$$\frac{\mathcal{F}_2}{L_2}\,\varepsilon^{-\alpha_2 t} + \frac{m_{12}^2}{L_2\,(L_1 L_2 - m_{12}^2)}\,\mathcal{F}_2\,\varepsilon^{-\alpha_2 t} = \frac{\mathcal{F}_2 L_1 \varepsilon^{-\alpha_2 t}}{L_1 L_2 - m_{12}^2}$$

est seule à considérer. Comme précédemment elle deviendra après développement:

$$\frac{1}{\sqrt{L_2 N_2}}\,\mathcal{F}_2\,\varepsilon^{-\alpha_2 t}\,.$$

En écrivant:

$$\int_0^\infty i_2\,dt = \frac{\mathcal{F}_2}{R_2}$$

on aura finalement:

$$\alpha_2 = \frac{R_2}{\sqrt{L_2 N_2}}\,.$$

Les valeurs définitives de i_1 et i_2 deviennent ainsi, en remplaçant les flux ($\mathcal{F}_1$ et $\mathcal{F}_{1cc}$ par leurs valeurs connues; $\mathcal{F}_2$ par $MJ\cos\omega\tau$):

$$i_1 = \frac{J}{L_1 - (L_1 - N_1)\cos^2\omega(t+\tau)}\left[\sqrt{L_1 N_1} + (L_1 - \sqrt{L_1 N_1})\,\varepsilon^{-\frac{R_1}{\sqrt{L_1 N_1}}t} - \right.$$

$$\left. - (L_1 - N_1)\cos\omega\tau\,.\,\varepsilon^{-\frac{R_2}{\sqrt{L_2 N_2}}t}\cos\omega(t+\tau)\right]$$

$$i_2 = \frac{M}{L_2}\,J\left\{\cos\omega\tau\,\varepsilon^{-\frac{R_2}{\sqrt{L_2 N_2}}t} - \frac{\cos\omega(t+\tau)}{L_1 - (L_1 - N_1)\cos^2\omega(t+\tau)}\left[\begin{array}{c}\text{même}\\ \text{parenthèse}\\ \text{que pour } i_1\end{array}\right]\right\}.$$

La tension dans la phase restée ouverte est de forme très compliquée; j'entends par là sa valeur instantanée:

$$e_2' = -\frac{d}{dt}\,(m_{12}\,i_1)\,,$$

Digitized by Google

et je ne l'ai pas calculée. Mais on peut avoir le maximum de cette tension dans deux cas, assez simplement:

Pour $\cos \omega \tau = 0$ (pas de courant continu induit dans l'induit):

$$(e_2')_{max} = \omega \, M \, J \, \frac{L_1}{N_1}.$$

Pour $\cos \omega \tau = \pm 1$ (maximum de courant continu dans l'induit):

$$(e_2')_{max} = \omega \, M \, J \, \frac{2L_1 - N_1}{N_1}.$$

Elle est toujours plus grande que la tension à vide; elle pourrait même être considérablement plus grande (10 à 20 fois) si la saturation magnétique ne venait tempérer ces résultats.

N° 9.

État variable qui suit le court-circuit brusque sur une phase d'un alternateur diphase avec circuit amortisseur:

$$m_{12} \, \imath_2 + L_1 \, \imath_1 = \mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc}) \, \varepsilon^{-a_1 t}$$

$$m_{1'2} \, \imath_2 + L_1 \, \imath_1' = 0$$

$$m_{12} \, i_1 + m_{1'2} \, i' + L_2 \, \imath_2 = \mathcal{F}_2 \, \varepsilon^{-a_2 t}.$$

La 2e équation se rapporte à l'amortisseur.

Tirons $\imath_1$ et $\imath_1'$ des deux premières équations et remplaçons dans la 3e:

$$i_2 = \frac{1}{N_2} \left\{ \mathcal{F}_2 \, \varepsilon^{-a_2 t} - \frac{m_{12}}{L_1} \left[\mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc}) \, \varepsilon^{-a_1 t} \right] \right\}.$$

En écrivant:

$$\int_0^\infty \imath_2 \, dt : \frac{\mathcal{F}_2}{R_2}$$

on obtient:

$$a_2 = \frac{R_2}{N_2}.$$

Digitized by Google

On a de nouveau:

$$i_1 = \frac{1}{L_1}\left\{ \mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\,\varepsilon^{-a_1 t} - \frac{\mathcal{F}_2}{N_2}\, m_{12}\,\varepsilon^{-a_2 t} + \right.$$

$$\left. + \frac{m_{12}^2}{L_1 N_2}\left[\mathcal{F}_{1cc} + (\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc})\,\varepsilon^{-a_1 t} \right] \right\}.$$

En écrivant:

$$\int_0^\infty (i_1 - J)\, dt = \frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_{1cc}}{R_1}$$

on obtient:

$$a_1 = \frac{R_1}{2N_1}\,\frac{L_1 + N_1}{L_1}.$$

On voit ici s'appliquer la remarque que nous avons faite au sujet des constantes de temps, quand nous traitions le cas de l'alternateur en court-circuit diphase sans amortisseur: la constante est de la forme $\frac{R}{N}$ pour le circuit de la partie non polyphasée et de la forme:

$$\frac{R}{2N}\,\frac{L+N}{L},$$

ou sensiblement $\frac{R}{2N}$, pour les circuits de la partie polyphasée.

Finalement:

$$i_1 = J\left[1 + \frac{L_1 - N_1}{2N_1}\,\varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1}\frac{L_1+N_1}{L_1}t} - \frac{L_1 - N_1}{N_1}\cos\omega\tau\,.\,\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}\cos\omega(t+\tau) + \right.$$

$$\left. + \frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1}\cos 2\omega(t+\tau) + \frac{1}{2}\,\frac{(L_1 - N_1)^2}{(L_1+N_1)N_1}\,\varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1}\frac{L_1+N_1}{L_1}t}\cos 2\omega(t+\tau)\right]$$

$$i_1' = 2\left[\frac{L_1 - N_1}{L_1 + N_1}\sin 2\omega(t+\tau) - \frac{L_1 - N_1}{N_1}\cos\omega\tau\,.\,\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}\sin\omega(t+\tau) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2}\,\frac{(L_1 - N_1)^2}{(L_1+N_1)N_1}\,\varepsilon^{-\frac{R_1}{2N}\frac{L_1+N_1}{L_1}t}\sin 2\omega(t+\tau)\right]$$

$$i_2 = MJ\left[-\frac{2}{L_2 + N_2}\cos\omega(t+\tau) + \frac{1}{N_2}\,\varepsilon^{-\frac{R_2}{N_2}t}\cos\omega\tau - \right.$$

$$\left. - \frac{L_2 - N_2}{(L_2+N_2)N_2}\,\varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1}\frac{L_1+N_1}{L_1}t}\cos\omega(t+\tau)\right].$$

Digitized by Google

La tension dans la phase restée ouverte se déduit facilement:

$$e_2' = -\frac{d}{dt}\,(m_{12'}\,i_1 + m_{1'2'}\,i_1')\,;$$

après opérations (1):

$$e_2' = \frac{\omega\,M\,J}{L_1 + N_1}\left[\,2\,N_1 + (L_1 - N_1)\,\varepsilon^{-\frac{R_1}{2N_1}\,\frac{L_1+N_1}{L_1}\,t}\right]\cos\omega\,(t+\tau)\,;$$

elle reste toujours inférieure à la tension à vide, puisque la parenthèse est toujours plus petite que $(L_1 + N_1)$. On voit, quelle énorme importance a l'amortisseur à ce point de vue.

DISCUSSION

M. C. FELDMANN (Delft) *complimente M. Boucherot de son intéressante étude sur cet important problème. Il observe que les constructeurs, particulièrement ceux des turbo-alternateurs, prennent déjà des mesures pour éviter les effets des courts circuits, et recourent surtout à l'augmentation des fuites magnétiques. Il exprime sa reconnaissance à M. Boucherot, car, de tout ce qu'il a pu lire jusqu'ici sur la question, rien n'approche comme profondeur d'étude de ce qu'il vient d'entendre.*

M. E. J. BRUNSWICK (Paris) *s'associe aux éloges de M. Feldmann, il croit devoir insister sur certains points que M. Boucherot, trop modeste, a marqués parmi ses conclusions et dont on ne saurait trop faire ressortir l'importance.*

Jusqu'ici, les désastreux effets des courts-circuits n'ont guère été l'objet que de constatations douloureuses, et n'ont point encore donné lieu à de sérieuses analyses.

M. Walker, de l'I.E.E. de Londres, a traité cette question, mais une étude mathématique approfondie et complète manquait encore.

---

(1) En négligeant un petit terme en sinus.

Digitized by Google

M. Boucherot a fait une véritable synthèse des phénomènes, et son travail est d'un intérêt capital pour tous les techniciens sans exception, car, en même temps qu'il apporte une magistrale contribution à l'analyse des phénomènes, il donne de précieuses indications pour les prévenir.

La gratitude des Électriciens est, une fois de plus, acquise à M. Boucherot: M. Brunswick est heureux de remarquer que sur certains points les conclusions de M. Boucherot sont en parfait accord avec celles de M. Walker de l'I.E.E. de Londres. Il importe de noter, en particulier, l'importance des observations de M. Boucherot sur la nécessité de parfaitement isoler le rotor, surtout dans le cas des turbo-alternateurs, bien qu'ils ne doivent porter que du courant continu. Il résulte également de l'étude de M. Boucherot qu'il y a grand intérêt à augmenter les fuites magnétiques; ceci rend particulièrement intéressants les alternateurs à grande réaction et, par suite, les procédés de compoundage des turbo-alternateurs. Le nom de M. Boucherot est intimement lié à cette partie du problème.

Enfin, et à l'appui des conclusions de M. Boucherot, M. Brunswick rapporte qu'il a eu occasion de constater d'un façon indiscutable des accidents systématiques dans les rotors d'alternateurs monophases: il s'agissait de surtensions qui se produisaient précisément suivant les théories de M. Boucherot.

Les conditions dans lesquelles se développaient ces accidents étaient rendues plus sensibles en quelque sorte par les dispositions mêmes des machines. Il s'agissait de deux alternateurs monophases, 3000 volts et 50 périodes par seconde, conduits en tandem par une turbine à vapeur, et montés sur deux arbres distincts, mais rigidement accouplés, la mise en phase ayant dû etre faite une fois pour toutes au montage. Les induits des deux machines étaient montés en parallèle, et les inducteurs complètement feuilletés étaient couplés en série.

Les accidents se produisaient essentiellement dans les enroulements de l'inducteur, quand les machines donnaient du courant très déphasé. Des observations répétées démontrèrent que les rotors de ces deux machines devenaient, dans ces circonstances, le siège de force électro-motrice, en opposition et, par suite, non sensibles extérieurement mais supérieures à 1000 volts.

Le remède fut vite trouré: on monta en dérivation sur chacun de ces rotors une résistance sans self-inductance formant amortisseur.

M. Brunswick termine en disant qu'à l'avenir on profitera des enseignements de M. Boucherot à qui les techniciens devront une grande reconnaissance pour son beau travail.

M. S. P. Thompson (Londres) *s'associe en toute sincérité aux éloges*

Digitized by Google

que M. Brunswick vient de faire à M. Boucherot. Il rappelle seulement qu'un artifice fort en usage pour éviter les courts-circuits et leurs effets désastreux, consiste à donner aux machines, surtout à celles de grande puissance, beaucoup d'entrefer : il connaît une machine très récente, de la Westinghouse, un turbo-alternateur de 5000 Kw. qui a 8 centimètres d'entrefer.

M. C. SARLI (Berlin) *demande si ces études ont été étendues aux moteurs en se rapportant spécialement aux moteurs asynchrones mis en circuit brusquement ou à démarrage brusque.*

M. Boucherot répond qu'il n'a pas encore étendu ses recherches aux moteurs ; il y a lieu de croire que les résultats que l'on obtiendrait différeraient notablement de ceux des générateurs.

M. A. HALLEUX (Bruxelles) *rappelle un autre phénomène dû aux courts-circuits : celui de l'interversion de la polarité des excitatrices, qui s'explique par l'accroissement exagéré du champ antagoniste de réaction.*

M. Feldmann clôt la séance en remerciant encore une fois M. Boucherot de son intéressante Communication, et tous ceux qui ont pris part à l'importante discussion qui l'a suivie.

Digitized by Google

Motor-Generators, Converters and Rectifiers.

Rapporto sul tema N. 9 del Congresso.

Relatore SILVANUS P. THOMPSON F. R. S. (London).

1. — This report relates to a class of dynamo-electric machinery, the object of which is to change or convert electric energy from one form or variety to another form or variety. From this class of machinery is excluded the apparatus called the *Transformer*, which, though it also converts electric energy from one form to another, does so without employing any revolving parts. Also all those apparatus are excluded which, although they act as rectifiers of alternating currents, effect that operation by chemical means or by means of the electric discharge in vacuum bulbs.

2. — *Problem of Conversion.*

The problem of converting electric energy of one form into electric energy of another form presents itself in many aspects; and has resulted in many types of machinery. It is possible to consider the subject, either by classifying the species of the conversion to be accomplished, or by classifying the types of machine.

Conversion may be required between any two of the following kinds of current: continuous current, single-phase alternating current, two-phase alternating current, and three-phase alternating current. It may also be required without altering the kind of current to convert it with respect to voltage, or

Digitized by Google

frequency, or phase-relation, or wave-form. Further the purposes for such conversion may be different, as for example for boosting, or balancing, or for gaining variable speed in motor work; and the combinations of machines required for the solutions of these problems are in many cases themselves involved in other problems, such for example as the production of a generator of constant voltage working at a variable speed.

As to types of machine, there is a transition of construction from type to type: but the following are the principal types: *a)* Motor-generators with two magnet systems and two armatures; *b)* Motor-generators with one magnet and two armatures; *c)* Motor-generators with one magnet and one armature carrying two windings; *d)* Converters (also called Rotary Converters) having one magnet system and one armature with one winding; *e)* Cascade Converters (also called Motor Converters) having two interconnected systems of induction-motor and continuous current generator; *f)* Auto-converters (also called split-pole converters); *g)* Rectifiers; and *h)* Frequency changers. As the machines of this last class are to be dealt with by themselves in a separate Report, they will be but slightly dealt with here. It is more convenient in the present Report to deal with the subject according to types of machine, than to classify according to the kind of conversion to be effected. Hence the several types will be considered in systematic order.

3. — *Motor-Generators with two field-magnet systems, and two armatures.*

The crudest and most obvious method of conversion is to select a motor appropriate to the primary kind of current, and to couple it mechanically with a generator appropriate to the secondary kind of current. As we shall see, even in the most modern specialized machines to be considered, the apparatus can always be regarded as consisting of two parts, a motor part with a generator part superposed upon it; and the two functions of the parts may be distinguished even if the parts themselves are so blended as to be mechanically indistinguishable. The mechanical union upon one shaft, or upon two shafts mechanically coupled together, of a motor and a generator, is a very old device. Long distance transmission of electric energy involved, from the first, high voltage, and also in practice in-

Digitized by Google

volved the use of alternating currents. Distribution of electric energy in a local net-work for lighting, power, traction, etc., involved low-voltage, and in the majority of cases involved the use of continuous currents.

So the particular problem of conversion which presented itself earliest and on the largest scale to engineers is the problem of conversion from high-voltage alternating current (monophase in the earliest times, three-phase in recent years) to low-voltage continuous current. This kind of conversion still remains the dominant kind. An early example of machines so combined is furnished by the motor-generators installed in 1890 in the town of Cassel by Dr. Oscar von Miller, consisting of a synchronous monophase alternator of 66 KVA., working at 2000 volts, coupled mechanically at each end of its shaft to a bipolar continuous current generator giving each 210 amperes at 110 volts, the two generators feeding the two sides of a three-wire network. Modern motor-generator sets almost always consist of high-voltage, three-phase synchronous motors coupled to low-voltage continuous-current generators. All the chief constructive firms of Europe supply such motor-generators for traction and lighting; and they are in extensive use. A typical example is afforded by the motor-generators (six) supplied recently by Messrs Dick Kerr an Co. Ltd. of Preston to the Calcutta Electric Supply Corporation, each set consisting of a synchronous three-phase 14-pole motor, rated at 500 KVA., running at 428 R. P. M., giving 6000 volts at 50 cycles per second, coupled direct to a continuous-current generator with 6 poles of 450 Kw. output, shunt-wound, working at 450 to 550 volts, and having commutating poles.

Such machines have no electrical connexion whatever between their two parts. The whole of the electrical energy supplied (save the inevitable losses) is converted into mechanical energy delivered to the revolving shaft, and is at once reconverted into electrical energy in the generator part. Such machines are not self-starting, but must be brought up to synchronism either by being temporarily supplied on their continuous-current side, or else by means of an auxiliary induction-motor used as a starter. As there are in them two sets of electrical losses, as well as mechanical losses, the efficiency is limited. But they have the advantage that the regulation of the power-factor on the primary side and of the voltage on the secondary side

Digitized by Google

can be independently effected by varying the respective excitations of the two field-magnet systems.

Such motor-generators can also be used for the converse problem of converting from continuous-current to alternating.

Motor-generator combinations can obviously be arranged in other ways. Instead of a synchronous motor an asynchronous motor can be used and in this case the machine is selfstarting. Also the combination of two different alternating machines as motor and generator might be used to convert from single-phase to two-phase or three-phase or to change the frequency, or as a phase-shifter, or to alter the wave-form or the voltage. Commutator-motors for single-phase current do not appear to have yet been used in motor-generators. They might even be used for the generations part as well as for the motor part. The combination of an asynchronous motor with a synchronous generator possesses special properties making it useful as a frequency-changer.

4. — *Motor-generators with one magnet and two armatures.*

Such machines are the first stage toward the synthesis of the two parts. The same field-magnet, made broad enough to embrace both armatures, is a possible type of construction, but it limits the applications of the machine in various ways. With this construction no asynchronous alternating current motor or generator is possible. Voltage regulation takes a different aspect, because any change in the excitation of the magnet affects both parts.

Nevertheless on this plan there have been at times constructed continuous current converters.

5. — *Motor-generators with one magnet and one armature with two indipendent windings.*

The next stage toward fusion of the two parts is to provide a single armature core, but to wind it with two independent windings. If each winding is provided with its own commutator the machine becomes a continuous-current converter, suitable for receiving a current at one voltage and giving it out at another, according to the ratio of the number of armature

Digitized by Google

windings. Such a machine was indeed constructed by Gramme as early as 1874.

If used as a continuous-current balancer it is defective, since as the magnetic field is common to both windings there is no independent regulation of the voltage by changing the excitation. By making one winding extend a longer distance than the other (axially) along the armature core and applying to this extended part of the core an auxiliary field-magnet, an independent regulation of the voltage may be obtained; and if this auxiliary magnet is excited by the continuous-current entering or leaving the machine it will automatically vary the voltage as the load rises or falls.

A continuous current converter of this type may be arranged as a balancer by having two identical windings and two commutators, the electromotive forces of which are then put in series, the negative brush from one side and the positive brush from the other being joined to the neutral wire of a three-wire distribution. A further possible arrangement is to have at the motor side a high-voltage winding with its appropriate commutator and at the generator side two indipendent low-voltage windings, each with its own commutator, these two secondary windings generating equal electromotive forces to supply the two sides of a three-wire distribution. One can imagine also a balancer for a five-wire distribution by providing the armature with four indipendent (equal) windings, each with its own commutator, the four windings being put in series by connexions at the brushes. If in a machine of this type any alternating current winding designed in accordance with the number of poles, and connected down to the appropriate number of slip-rings for monophase, diphase or triphase working, be wound on the armature, that side will serve for either synchronous motor or synchronous generator.

If both windings are of this description this type may be used as a phase-changer but not a frequency-changer.

With one such alternating-current winding, combined with a continuous-current winding the machine acts as a synchronous converter.

6. — *Converters* (also called *Rotary Converters*).

In this type there is but one field magnet system, excited in shunt (from the continuous current side) or independently, or

Digitized by Google

compound wound, and but one armature winding. This winding is connected at one side to an ordinary commutator, but is also connected, at the other side, at points symmetrically chosen with respect to the windings and to the number of pole-pairs, to an appropriate number of slip rings. The advantages and limitations of this type are very well known. The machine runs only as a synchronous machine. It is not self starting from the alternating current side. Except by special provision mentioned here after it does not permit of independent regulation of the voltage, the voltage between the brushes on the continuous current side being practically in a fixed ratio to that between the slip-rings or the alternating side. Though such a machine can be used to convert from alternating current (of one, two or more-phases) to continuous current, or vice versa, it cannot of itself fulfil the condition of solving the dominant problem of changing from high voltage to low; therefore in all such cases step-down transformers are needed to reduce the voltage. Owing to there being but one armature winding the sources of loss of energy are reduced, particularly if the number of phases by which the currents are introduced on the alternating side is great. Converters with six slip-rings, wound for six-phase current are more efficient than those with but three; and it is very easy to arrange the windings on the three-phase step-down transformer so that it yields six-phase current on its secondary side. The efficiency of transformers is so high that the total losses for transformer and rotary converter are less than those of a motor-generator set of equal output.

A long controversy has raged between the advocates of converters and those of motor-generators. All sorts of disadvantages have been attributed to converters: not only was their voltage fixed so that regulation was difficult, but when running in parallel they were apt to "hunt„; they were apt to reverse polarity; they were — at least unless designed for a very low frequency, and with consequent wide pole-pitch — apt to flash over at the commutator. All these defects have been successfully combatted. Converters working at frequencies of 50 or even 60 cycles per second can be designed to give satisfaction, though undoubtably frequencies of 33 or 25 are preferable. The addition of an amortisseur in the poles has eliminated "hunting„. The problem of regulating the voltage has found several solutions. By transformers having considerable self-induction in their

Digitized by Google

secondary circuits, or by introducing into their secondary circuits between the transformer and the converter appropriate self-induction coils, it has been possible to regulate the voltage on the continuous current side by merely varying the excitation of the field magnet; increasing the excitation raises the voltage on the continuous side, and while it necessarily also raises the alternating voltage of reaction it tends to put forward the phase angle and counteract the drop in the power-factor due to the self-induction of the transformer. A second method of regulation is to add a synchronous booster on the shaft of the converter, the voltage of the incoming alternating currents being increased as the continuous current output increases. A third method is to design the polar parts of the field magnet so as to alter the waveform of the alternating electromotive force induced by the armature.

The devices of Woodbridge for surrounding portions of each pole by coils for increasing or diminishing the magnetic fluxes in the pole-tips as compared with the flux in the central part of the pole, afford a tolerable though not automatic means of regulation. In a modification due to Burnham each pole is divided into two parts the excitations of which can be independently controlled. A fourth method, due to Miles Walker, is to design the field-magnet of the converter to give a carefully graduated commutation zone, so that the voltage may be regulated by varying the lead given to the brushes.

Modern opinion seems to favour the use of converters in lieu of motor-generator sets, and the objections to them appear to have been largely overcome.

They are occasionally designed with vertical shafts to economize space.

Two rotary converters united together at their continuous-current sides might work as a frequency-changer, due regard being had to the number of poles and to the voltages.

7. — *Cascade Converters.*

In these machines two systems, an induction-motor and a continuous-current generator, are interconnected electrically as well as mechanically. The motor part is an induction-motor, into the stator of which the high-voltage three-phase current is brought. The rotor is on the same shaft as the armature of

Digitized by Google

a continuous-current generator, and is connected to that armature electrically, the armature windings being connected back symmetrically to the windings of the rotor, precisely as the armature windings are connected back to the slip-rings in a rotary converter. As a result, the rotor runs synchronously, with a constant slip of 50 per cent; and half the power is transmitted electrically direct through the armature to the brushes, while the other half of the power drives the armature mechanically and generates the remaining half of the output delivered at the brushes.

The efficiency of the machine is high; in general rivalling that of the combined rotary converter and transformer, and surpassing that of the simple motor-generator set of equal output. So much has been written upon the cascade converter by Arnold, Bragstad, La Cour and Hallo that no extended notice is here necessary. Cascade converters are now usually built as 12-phase machines in the rotor part, and are provided with commutating poles on the field-magnet. They also can be built with an alternating booster between the rotor and the armature, for procuring independent voltage-regulation.

8. — *Revolving-Field Converters.*

A curious type of machine is one in which the motor part resembles on ordinary alternator, but the stator of which is provided with two windings. One of these, on ordinary stator winding, receives the incoming high-voltage currents. The other winding, in the same slots, is an ordinary drum-winding for the same number of poles, connected down to a commutator, which is stationary. The brushes revolve synchronously (pressing against the inside surface of the commutator), being carried round by the revolving field-magnet. The poles of the field-magnet need not be wound, being magnetized by the stator currents. In this case the electric energy is transformed and converted electrically. As thus described, the machine is Arnold's modification of an earlier and more complex apparatus of Hutin and Leblanc, in which not even the iron of the field-magnet revolved. The " permutatrice „ of Rougé and Faget belongs to this class, having revolving brushes, and no windings on the revolving iron magnet. The " permutator „ of Sahulka and the recent rectifier of Auvert and Ferrand, also belong to this category.

Digitized by Google

9. — *Rectifiers.*

From such machines as the foregoing, in which syncronously revolving brushes receive the continuous current, it is but a step to the much older rectifiers, devices by which it was sought to procure a uni-directional current from a simple alternating current by merely passing it through a synchronously revolving commutator or reverser. The rectifying commutator used in Wilde's alternators, and later in those of Zipernowsky, was an early example. Still later came the rectifiers of Pollak for accumulator charging, and of Ferranti for arc-lighting. But none of these were satisfactory for rectifying large currents, since in the first place there was difficulty about sparking, and in the second the currents so rectified were pulsatory in character, and not really continuous. Heyland's commutator for making a three-phase generator self-exciting belongs to the class of rectifiers, as the brushes on the commutator reverse the alternating currents, synchronously, without being provided with a magnetic field to procure sparkless commutation.

10. — *Frequency-Changers.*

Various combinations may be used to change the frequency of an alternating current. Two synchronous alternators having appropriate numbers of poles, coupled on one shaft, would form a motor-generator set suitable for this purpose. Behrend has constructed one of 2000 kilowatts for service at Montreal. Steinmetz has suggested the combination of a synchronous with an asynchronous machine; but the latter cannot be used as the generator part unless the system it supplies has other synchronous machines upon it to fix the frequency. The case of a pair of coupled rotary converters has already been mentioned; and a pair of cascade converters might also serve the same object. A more hopeful suggestion is to couple mechanically the rotors of a pair of ordinary induction motors of appropriate voltages and numbers of poles; the combined machine running at such a speed as to be below synchronism for the motor part, and above synchronism for the generator part. Such a combination would serve for interconnexion of the networks of two generating stations.

Digitized by Google

11. — *Phase-Shifters.*

For the infrequent purpose of changing or shifting the phase of an alternating current, special machines are occasionally needed; and the principle of them is simple. Consider an ordinary induction motor. The currents coming into the stator there conspire to produce a progressive or rotatory magnetic field. If a coil be wound on the stator through two slots which are a pole-pitch apart, there will be induced in that coil an alternating electromotive force of the same frequency as that of the current supplied; but the phase of this induced electromotive force will depend on the position of the slots with respect to that of the windings. If two such coils are wound in different positions the phase-difference between their respective electromotive forces will depend solely on the angle by which their respective positions differ. Hence one could easily wind a stator with two sets of windings, a primary or motor winding, and a secondary or generator winding, the latter giving out alternating currents of the same frequency, but of different phase-angle, or even with a different number of phases from that of the primary current. Thus a machine may be constructed to convert three-phase current into two-phase or single-phase, or *vice versa.* Or, finally, two-phase tappings may be taken off from the stator windings of a three-fase motor; or three-phase tappings from those of a two-phase, or even of a single-phase motor. Such phase-converters were suggested independently by the author and by Arno. Another method is to couple together the revolving field-magnets of a pair of ordinary synchronous alternators; one to serve as motor, the other as generator. By shifting the stator of either machine through the appropriate angle any desired phase-difference between their respective electromotive forces can be obtained. Such a combination has been used to shift the load of a network from one generating station to another.

12. — *Auto-converters.*

The most recent type of converting machine is the auto-converter (also called the split-pole converter), the chief characteristic of which is the construction of the field-magnet with twice as many polar projections as there are poles in the winding of the armature ; these magnet poles being arranged in

Digitized by Google

pairs of the same polarity. As these machines seem destined to have an important future, some extended notice of them is desirable.

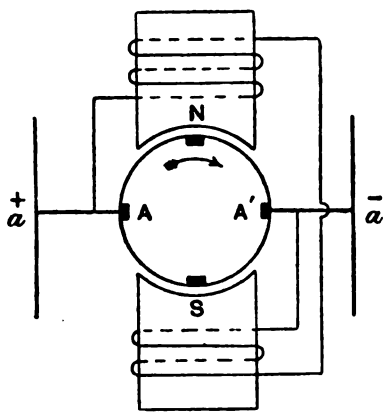


Fig. 1.

Consider, fig. 1, a two-pole armature with its ordinary windings and commutator. The windings span approximately across a diameter, and the two ordinary brushes stand at opposite ends of a diameter. There are two pole-pitches or regions, one usually occupied by the North pole, the other by the South pole of the magnet system. If the brushes are placed in the usual positions for collecting current (" neutral points „), the difference of potential between them (on open circuit) is then a maximum. If they are shifted through half a pole-pitch, that is through a right-angle, the difference of potential between them is reduced to zero. In intermediate positions they receive intermediate voltages, but might give trouble by sparking. But by adopting the modern method of compensating windings, current can be collected sparklessly, either at the neutral points or in other positions.

Suppose now we divide each of the poles of the field magnet into two, so that the North pole N is replaced by the two poles N_1 and N_2, side by side, and that the South pole S is replaced by the two poles S_1 and S_2, as in fig. 2. The pair

Digitized by Google

$N_1 S_1$ may be considered as belonging to one magnetic circuit, the pair $N_2 S_2$ as belonging to a second and independent magnetic circuit at right angles to the first.

If the first pair only is excited, the voltage between the brushes $A_1 A_2$ will be that due to $N_1 S_1$: if the second pair only is excited, the voltage between the brushes $A_1 A_2$ will be that due to $N_2 S_2$.

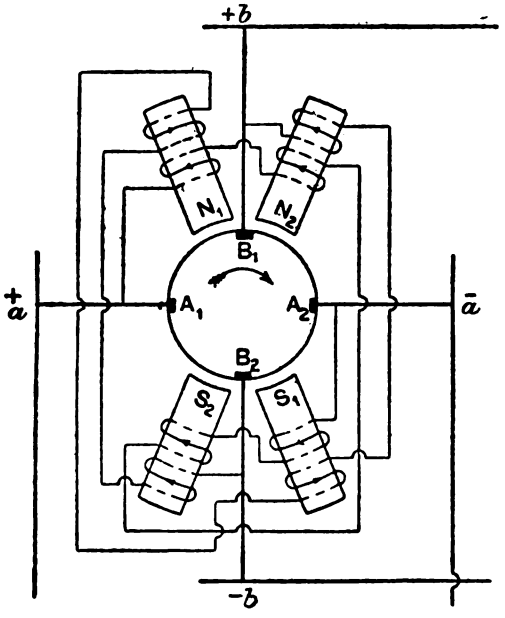


Fig. 2.

If both pairs are excited, the voltage between the brushes $A_1 A_2$ will be that due to the whole flux going from N_1 and N_2 together, through the armature, to S_1 and S_2. Now suppose a second set of brushes $B_1 B_2$ placed in a position at right-angles to $A_1 A_2$. It is obvious that if both pairs of poles are excited, the voltage between the brushes $B_1 B_2$ will be that due to the difference between the two fluxes of the magnetic circuits. If we call the two fluxes F_1 and F_2, respectively, the voltage across $A_1 A_2$ will be proportional to $F_1 + F_2$, and that across the brushes $B_1 B_2$ will be proportional to $F_1 - F_2$. [If we consider the partial voltages across from A_1 to B_1, and from B_1 to A_2,

Digitized by Google

these will respectively be proportional to F_1 and F_2]. If now on these poles exciting coils are wound, such that F_1 is made proportional to the sum of the A and B voltages, and that F_2 is made proportional to the difference of the A and B voltages, as can be effected by shunt coils which are wound summationally on the pair $N_1 S_1$, and differentially on the pair $N_2 S_2$, then the generated A voltage, which is proportional to $F_1 + F_2$, will depend on the A excitation only, while the generated voltage between the B brushes, which is proportional to $F_1 - F_2$, will depend on the B excitation only. In other words each half of the machine will act as an independent self-excited shunt-wound generator. Each half may of course be also compound-wound, or might even be merely series-wound following an analogous plan. Figure 3 depicts the combination arranged as a four-pole machine; but in reality it consists of a single armature acted upon by two independents two-pole field-magnets. So the single machine thus arranged becomes the equivalent of two independent machines coupled together. So far we have described it as a double generator; but obviously it can be used as a continuous current converter, one part acting as motor, the other as generator. The term " Auto-converter „ is more descriptive, seeing that there is only one armature winding.

If a continuous current is applied to the brushes $A_1 A_2$, it will run as a motor, and an independent continuous current will be generated in it and delivered at the brushes $B_1 B_2$. If the pole-sections and windings are alike, the fluxes will be equal and the voltages equal. They can be made unequal by altering the pole-sections or the reluctances of the magnetic circuits, or the resistances of the exciting circuits, or by shifting the brushes to intermediate angles. With suitable modifications such a machine can be used as balancer, or booster, or as a three-wire generator.

If, instead of adopting the method of excitation described above, one of the magnet pairs $N_1 S_1$ is independently excited, and the second magnet pair $N_2 S_2$ is excited from the brushes pertaining to the field of the first pair, the machine then becomes a variable-speed generator, and will furnish at the brushes pertaining to the second pair an approximately constant voltage, at any speed, with either direction of rotation, as is required in train-lighting.

Now suppose the same armature to be connected at the appropriate symmetrical points to three slip-rings. The same ma-

Digitized by Google

chine will then be capable of being used as a synchronous rotary converter, and could furnish two different continuous currents at the same time, at equal or different voltages.

In the fore-going it has been assumed that armature reaction is absent or has been compensated. If, instead of the armature reaction being compensated, it is enhanced by short-circuiting

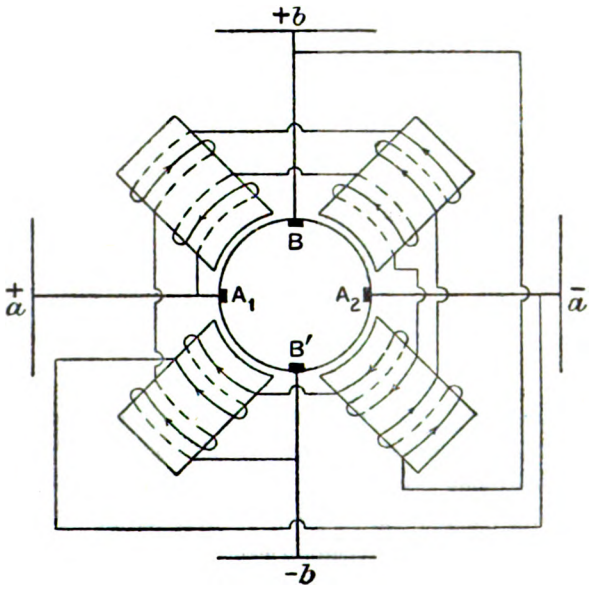


Fig. 3.

one pair of brushes, fresh developments are possible; and on this procedure there have been based a number of interesting machines such as the train-lighting generators of Rosenberg, Leitner, Midgeley and others; also Woodbridge's exciter for three-phase systems.

Of auto-converters that of Crompton-Macfarlane-Burge has obtained wide application. Considering the machine in its bipolar form, the generator electromotive force is tapped off at the commutator from one of the A_1 A_2 brushes of the motor circuit and from a pair of connected B brushes situated at equipotential points not necessarily on a diameter at right angles to A_1 A_2. To make these B points equidistant from the A brush,

Digitized by Google

as well as equipotential, the two divided pole pairs are arranged in bilateral symmetry with respect to the $A_1 A_2$ axis; N_1 being the same size as S_2, and N_2 as S_1. These machines are being used 1) as step-down continuous-current converters, 2) as voltage regulators, 3) to convert from variable current at constant voltage to constant current within a limited range, 4) as rotary converters affording regulation of the continuous voltage without affecting the power-factor on the alternating side.

RÉSUMÉ

1. — *Ce rapport est limité à cette classe de machines dynamo-électriques dont l'objet est de changer ou de convertir l'énergie électrique d'une forme quelconque en énergie électrique d'une autre forme. L'appareil dit " transformateur „, quoique convertissant l'énergie électrique des courants alternatifs par changement de tension, n'est pas une machine rotative et reste en dehors de la catégorie envisagée ici. Restent également en dehors de cette catégorie tous les appareils redresseurs opérant par voie chimique ou par décharges dans des ampoules au vide.*

2. — Problème de la Conversion.

Le problème dè la conversion de l'énergie électrique d'une forme en une autre se présente sous plusieurs aspects, et les solutions trouvées jusqu'ici ont donné lieu à divers types de machines. Pour établir une classification, il est plus commode de considérer les types de machines plutôt que de considérer les divers genres de conversions; souvent, en effet, une machine de type donné peut satisfaire à plusieurs modes de conversion. Quant aux types de machines, on observe une transitions, à peu près continue, d'un type à un autre; toutefois les types principaux sont les suivants:

a) Groupe moteur-génératrice *comportant deux systèmes d'inducteurs, et deux bobines rotatives;*

Digitized by Google

b) Moteur-génératrice *à système inducteur unique et deux bobines;*

c) Moteur-génératrice *à système inducteur unique et une bobine à deux enroulements;*

d) Convertisseur *(ou Commutatrice) à système inducteur unique et bobine unique à un seul enroulement;*

e) Convertisseur en cascade *(système E. Arnold - J. L. la Cour), combinaison d'un moteur asynchrone et d'une commutatrice;*

f) Permutatrices *à balais rotatifs, et machines à inducteur rotatif;*

g) Redresseurs, *rectifiant les courants alternatifs;*

h) Transformateur de fréquence, *changeant la fréquence d'un courant alternatif en une autre;*

i) Transformateurs de phase, *destinés à la production d'une avance ou d'un retard de phase d'un courant alternatif;*

j) Auto-convertisseur, *forme moderne de commutatrice, à un seul enroulement, mais possédant deux systèmes d'inducteurs ou des inducteurs à pôles divisés.*

Ces divers types peuvent être considérés comme des développements de l'idée fondamentale de la combinaison de deux organes, tel qu'un électromoteur d'un type quelconque avec génératrice d'un type quelconque. Les applications nombreuses de ces combinaisons rotatives, par exemple comme survolteurs-dévolteurs, comme régulateurs de tension, comme égalisateurs de distribution, comme régulateurs de charge entre deux stations génératrices, etc., sont examinées dans la revue des types successifs. En passant, quelques vues sont indiquées relativement à d'autres applications de certains de ces systèmes; parmi celles-ci, l'on peut citer leur emploi possible comme moyens de compoundage, comme génératrices simultanées de courants alternatifs et de courant continu, ou comme génératrices à vitesse variable telles que celles employées pour l'éclairage des voitures de chemin de fer.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. P. BOUCHEROT (Paris), *à propos des transformateurs de phases indique qu'il a été amené à s'occuper de ces machines quelques années avant l'Exposition Universelle de 1900.*

Les constructeurs de la plateforme mobile qui a fonctionné à Paris dans cette Exposition, avaient eu tout d'abord l'idée de commander la marche de cette plateforme mobile à l'aide de moteurs polyphasés. Il fallait réaliser 300 de ces moteurs avec la certitude qu'ils démarrassent tous au même instant et coopérassent également au démarrage assez pénible de la plateforme. Il ne fallait pas songer aux moteurs à cage d'écureuil ni aux moteurs à induits bobinés qui eussent demandé 3 x 300 conducteurs pour les induits. M. Boucherot proposa alors les moteurs de son invention, construits par la Maison Bréguet à double stator et à double rotor, déjà bien connus alors en France. Dans ces moteurs, l'un des stators peut être alimenté directement par la source de courant polyphasé et l'autre par des courants décalés ; en conséquence, l'installation ne demandait plus que deux lignes triphasées, pour l'alimentation des 300 moteurs ; par contre, un transformateur de phases d'une puissance égale à celle correspondant à la moitié de l'effort de démarage devenait nécessaire ; deux solutions se présentaient :

1° Employer un moteur triphasé à rotor ne tournant pas, mais pouvant être déplacé angulairement par un dispositif mécanique quelconque, et possédant un enroulement identique à celui du stator (à quelques spires près pour compenser la chute de tension). Au décalage mécanique du rotor correspond évidemment un déphasage égal pour un appareil à 2 pôles.

2° Employer un système à champ tournant analogue à l'induit (immobilisé) d'une commutatrice, mais à circuit magnétique fermé, et ayant, sur le collecteur, 3 balais décalés de 120°, pouvant être déplacés simultanément. Au déplacement angulaire des balais correspond encore un déphasage égal, pour un appareil à 2 pôles.

Digitized by Google

En définitive, la plateforme fut commandée par des moteurs à courant continu.

M. Boucherot demande encore la permission d'ajouter aux machines citées par M. Thompson, la dynamo à enroulements sinusoïdaux, très employée pour l'excitation des alternateurs compound.

La description complète de cette machine et sa théorie, " la théorie du compoundage „, ont paru vers 1900 dans plusieurs publications françaises et étrangères. En principe, cette dynamo se compose du stator d'une machine à champ tournant, et d'un rotor à collecteur à enroulement sinusoïdal. Cette dynamo, alimentée avec des courants triphasés, donne entre ses balais du courant continu pour une certaine vitesse.

Comme simple commutatrice, elle n'offre aucun intérêt, mais appliquée à l'excitation des alternateurs compound elle présente des avantages notables.

Il existe en France quelques centaines d'alternateurs compound excités au moyen de machines de ce type.

M. E. J. Brunswick (Paris) *pense que l'intéressante machine décrite par M. Thompson sous le nom de " autoconverter „ doit avoir probablement un assez faible rendement. Il observe que le nombre double de pôles et les induits, qui doivent avoir une résistance élevée, doivent donner lieu à des pertes élevées par effet de Joule.*

Dans ces machines à pôles fractionnés et à balais supplémentaires, l'adoption de pôles auxiliaires, entraînant une considérable dispersion de flux et des pertes élevées dans l'excitation, semble inévitable; comme conséquence, l'utilisation des matériaux est beaucoup moins parfaite que dans les machines normales, ce qui conduit aussi un rendement inférieur.

Ces remarques, ajoute M. Brunswick, ne diminuent rien d'ailleurs l'intérêt que mérite une classe si originale de machines, lesquelles répondent parfaitement à leur objet dans les cas spéciaux où elles sont employées.

M. J. L. Routin (Lyon) *désire signaler seulement que la maison " Grammont , a présenté, à l'Exposition de 1900, un alternateur compound excité par une machine spéciale, système Maurice Leblanc, laquelle, bien que différente comme principe et comme construction de celle dont M. Boucherot vient de rappeler le principe et les applications, remplissait le même office et permettait de transformer directement du triphasé en courant continu.*

M. V. Mouchard (Tunis) *note que M. Rougé, inventeur de la " permutatrice „, a fait récemment construire de nouvelles machines, dites " Rectificatrices „, dans lesquelles les parties fixes, telles que le collecteur, sont rendues mobiles, tandis que les balais sont fixes. Il a évité ainsi*

Digitized by Google

l'inconvénient des balais qui tournaient, et supprimé, par vérité, le point faible de sa permutatrice.

M. Thompson exprime ses remercîments pour l'intérêt avec lequel sa communication a été accueillie. Il ajoute que les " Autoconverters " sont en grande faveur en Angleterre, et que la maison qui les construit a beaucoup de commandes.

Le Président remercie encore M. Thompson et clôt la discussion.

Digitized by Google

Der Kaskadenumformer

Dr. Ing. H. S. Hallo (Karlsruhe i. B.).

Der Kaskadenumformer, der bekanntlich aus der mechanischen und elektrischen Kupplung eines Induktionsmotors und einer Gleichstrommaschine besteht, wurde im Jahre 1902 erfunden (1), und fand bald darauf ausgedehnte Anwendung in Gross-Britannien und seinen Kolonien. Die schottische Firma Bruce Peebles & Co. Ltd. war die erste, die die Vorteile des neuen Umformers für bestimmte Zwecke erkannte. Nachdem sie grosse Erfolge mit diesem neuen Maschinentyp erreicht hatte, folgten mehrere kontinentalen Firmen ihrem Beispiel. Hier sind in erster Linie die Siemens-Schuckert-Werke zu erwähnen.

Da der Kaskadenumformer teilweise als Motorgenerator, teilweise als rotierender Umformer arbeitet, halten seine Eigenschaften gewissermassen die Mitte zwischen denen des Motorgenerators und denen des Umformers. Wo nun einerseits die Gesamtleistung der sich in Betrieb befindlichen Kaskadenumformer, die etwa 150.000 KW beträgt, ein deutlicher Beweis dafür ist, dass in sehr vielen Fällen eine Maschine mit derartigen Eigenschaften erwünscht ist, andererseits aber gerade in letzterer Zeit die Einankerumformer wesentlich verbessert wurden,

(1) D. R. P. 145434 O. S. Bragstad und J. L. la Cour.

Digitized by Google

dürfte es von Interesse sein einige der wichtigsten Eigenschaften des Kaskadenumformers einer näheren Betrachtung zu unterziehen.

Wegen der beschränkten Zeit müssen sowohl die *Arbeitsweise als die wichtigsten Eigenschaften* des Kaskadenumformers, die in den Büchern " Der Kaskadenumformer „ von E. Arnold und J. L. La Cour und " Die Eigenschaften des Kaskadenumformers und seine Anwendung „ von H. S. Hallo ausführlicher beschrieben sind, als bekannt vorausgesetzt werden.

Da die meisten Kaskadenumformer mit der gleichen Polzahl an der Gleich- und Wechselstromseite ausgeführt werden, wird die Hälfte der elektrisch zugeführten Energie direkt umgeformt, während die andere Hälfte erst in mechanische Energie umgewandelt wird. Der Induktionsmotor läuft dann nämlich mit der halben Tourenzahl des Drehfeldes. Die in den Rotorwindungen induzierten EMK*e* sind dann halb so gross wie beim Stillstand bei demselben Hauptkraftfluss und demzufolge wird — abgesehen von den Verlusten — nur noch die Hälfte der Energie transformatorisch übertragen, während die andere Hälfte als mechanische Energie durch die Welle übertragen wird. Dementsprechend wirkt die Gleichstromseite zur Hälfte als Umformer, zur Hälfte als Gleichstromgenerator.

Daraus können wir folgendes schliessen:

1. Der Wirkungsgrad des Kaskadenumformers ist im allgemeinen kleiner als der des Einankerumformers, jedoch grösser als der des Motorgenerators. Nachher werden die Gründe angegeben, weshalb im praktischen Betriebe der Wirkungsgrad des Kaskadenumformers nur wenig gegen den des Einankerumformers zurückbleibt.

2. Der Preis des Kaskadenumformers hält die Mitte zwischen dem eines Einankerumformers und eines Motorgenerators. Nachher werden die Fälle erwähnt wo der Preis des Kaskadenumformers sich nahezu gleich demjenigen des Einankerumformers stellt.

3. Mit Bezug auf Spannungsregulierung verhält der Kaskadenumformer sich günstiger als der Einankerumformer, kommt jedoch dem Motorgenerator keineswegs gleich. Um die wattlosen Ströme in der Statorwicklung bei weitgehender Spannungsregulierung an der Gleichstromseite klein zu halten, wäre es nötig der Wechselstromseite eine grosse Streureaktanz zu geben. Dadurch wird aber die Ueberlastungsfähigkeit verringert. Es kommt

Digitized by Google

nun öfters vor, dass die Gleichspannung mit der Belastung automatisch zunimmt (überkompoundierte Umformer) und in dem Falle könnte das Uebersetzungsverhältnis so gewählt werden, dass bei einem für die Ueberlastungsfähigkeit zulässigen Wert der Reaktanz, der wattlose Strom bei Vollast klein ist. Allerdings würde dann der wattlose Strom bei Leerlauf zu gross werden. Es ist somit erwünscht die Maschine derart zu dimensionieren, dass die Reaktanz bei Leerlauf wesentlich grösser ist als bei Vollast. Ein Mittel um das zu erreichen haben wir in der vollständigen Schliessung der Nuten. Es schliesst sich dann ein Streufluss durch den Nutensteg, der anfangs nahezu proportional mit der Stromstärke wächst, bald jedoch weniger schnell zunimmt, um schliesslich, nachdem die Sättigungsgrenze erreicht ist, nahezu konstant zu bleiben. Der gesamte Streufluss setzt sich aus diesem Streufluss und einem, der hauptsächlich durch die Luft verläuft und daher proportional der Stromstärke ist, zusammen. Deswegen ist die Reaktanz nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmender Stromstärke ab. Durch richtige Dimensionierung der Nutenstege lässt sich nun erreichen, dass sogar stark überkompoundierte Kaskadenumformer zwischen $^3/_4$ und Vollast mit dem Leistungsfaktor *Eins* arbeiten und dennoch bei Leerlauf dem Netze nur einen verhältnismässig kleinen wattlosen Strom entnehmen.

4. Der Kaskadenumformer ist ebenso wie der Motorgenerator weniger zum pendeln geneigt als der Einankerumformer. Die Tatsache, dass die Praxis gezeigt hat, dass 50 periodige Einankerumformer viel mehr zum pendeln geneigt sind als 25 periodige, weist schon auf günstigere Bedingungen für den Kaskadenumformer hin, bei dem die Periodenzahl der Gleichstromseite nur etwa die Hälfte der Periodenzahl des entsprechenden Einankerumformers beträgt.

5. Aehnliche Resultate ergeben sich auch in Bezug auf den Einfluss der Oberströme und die Rückwirkung auf das Netz.

Dazu kommt dann noch, dass der Kaskadenumformer fast ebenso einfach von der Wechselstromseite angelassen werden kann, als der asynchrone Motorgenerator, während die synchronen Motorgeneratoren und Einankerumformer entweder spezielle Anwurfsmotoren brauchen, oder aber dem Netze wesentlich grössere Anlassströme entnehmen, die zum grössten Teile wattlos sind und deswegen zu grossen Spannungsschwankungen Anlass geben. Bei den Einankerumformern hat man dann ausserdem

Digitized by Google

noch die Möglichkeit, dass die Gleichstromseite sich mit falscher Polarität erregt und dass — während der Anlassperiode — Feuer an den Bürsten auftritt.

Mit Bezug auf den Leistungsfaktor an der Wechselstromseite verhält sich — bei gleichen Bedingungen — der synchrone Motorgenerator weitaus am günstigsten, da dieser nicht nur unter allen Belastungen mit dem Leistungsfaktor *eins* arbeiten kann (abgesehen von den Oberströmen), sondern ausserdem je nach Bedarf einen wattlosen Strom in das Netz liefern kann. Auch in dieser Hinsicht steht der Kaskadenumformer mitten zwischen dem synchronen Motorgenerator und dem Einankerumformer. Der asynchrone Motorgenerator hingegen kann niemals mit dem Leistungsfaktor *eins* arbeiten.

Es ist hier nicht beabsichtigt die schon öfters in der Literatur behandelten Vor- und Nachteile der einzelnen Maschinentypen näher zu erörtern (1). Nach obiger kurzer Uebersicht über die wichtigsten Unterschiede, sei hier vielmehr auf einige im allgemeinen nicht genügend gewürdigte Erscheinungen, die sich teils als Vorteile, teils als Nachteile für den Kaskadenumformer erweisen, hingewiesen.

Mit Bezug auf den Wirkungsgrad des Kaskadenumformers lässt sich bemerken, dass, trotzdem seine Gleichstromseite zur Hälfte als Umformer und zur Hälfte als Gleichstromgenerator wirkt, die Verluste in der Gleichstromankerwicklung in vielen Fällen kleiner sind als der Mittelwert aus den Verlusten in der Ankerwicklung eines gewöhnlichen Gleichstromgenerators und eines Einankerumformers. Es ergibt sich nämlich, dass durch die Phasenverschiebung zwischen Wechselstrom und Wechselspannung die Verluste in einzelnen Spulen zu-, in andern jedoch abnehmen, sodass die Gesamtverluste nur sehr wenig zunehmen, während bei dem Einankerumformer in diesem Falle eine sehr starke Zunahme der Verluste auftritt. Wenn man diese Tatsache rechnerisch verfolgt, so zeigt sich, dass unter Umständen die Verluste im Gleichstromanker des Kaskadenumformers gar nicht grösser sind als die des entsprechenden rotierenden Umformers, namentlich wenn grössere nacheilende wattlose Ströme (etwa 30 % oder mehr) abgegeben werden sollen. Allerdings muss man

---

(1) Ein ausführlicher Vergleich findet sich in: " Die Eigenschaften des Kaskadenumformers und seine Anwendung „ von Dr. Ing. H. S. Hallo.

Digitized by Google

dabei berücksichtigen, dass die Gleichstromseite des Kaskadenumformers auch den Magnetisierungsstrom für die Wechselstromseite zu liefern hat. Dieser nimmt, entsprechend der Abnahme des Hauptkraftflusses von Leerlauf bis Vollast infolge des Spannungsabfalles in der Primärwicklung, etwas ab. Andrerseits aber muss die Gleichstromseite bei Belastung noch einen zusätzlichen wattlosen Strom liefern, um die Phasenverspätung, die der primäre Strom gegen die primäre Klemmenspannung haben würde infolge der Streureaktanz der Statorwicklung, zu kompensieren. Diese verhältnismässig kleine Zunahme der Verluste in der Gleichstromankerwicklung des Kaskadenumformers bei abnehmendem Leistungsfaktor, ist besonders wichtig, wenn man bedenkt, dass Kaskadenumformer — als *Phasenregler* benutzt — oft eine wattlose Leistung in K. V. A. zu liefern haben, die gleich gross oder gar grösser ist als die Leistung in K. W. So wurden z. B. von der Westinghouse Gesellschaft an die französische Marine mehrere Umformer von 72 KW geliefert, die ausserdem einen wattlosen Strom entsprechend 72 KVA in das Netz zu liefern haben, und die unter diesen Umständen, kleinere Verluste in der Gleichstromwicklung aufweisen als entsprechende Einankerumformer.

Bekanntlich nimmt der rotierende Umformer wegen seiner kleinen Reaktanz grosse Oberströme auf. Da die von diesen Oberströmen verursachten Verluste zwischen Leerlauf und Vollast sich nicht viel ändern, ist der Unterschied des Wirkungsgrades eines Einankerumformers und eines Kaskadenumformers am grössten für Vollbelastung.

Da Gleich- und Wechselspannung beim Einankerumformer in derselben Wicklung induziert werden, besteht ein bestimmtes Uebersetzungsverhältnis zwischen ihnen. Der rotierende Umformer braucht deswegen in fast allen Fällen einen Transformator. So lange nun der Kaskadenumformer noch ohne Transformator ausgeführt werden kann (bis etwa 10.000 Volt), bleibt aus obigen Gründen der Wirkungsgrad des Kaskadenumformers im praktischen Betriebe nur wenig gegen den des Einankerumformers zurück. Für höhere Wechselspannungen stellen sich allerdings sowohl die Kaskadenumformer als die Motorgeneratoren in dieser Hinsicht wesentlich ungünstiger.

Vergleichsweise sei hier angegeben, dass nach den Angaben verschiedener Firmen für 1.000 KW. Umformeraggregate (50 Perioden) etwa folgende Werte erreicht werden können.

Digitized by Google

Einankerumformer ohne Transformator	95,2 %
„ mit „	93,5 %
Kaskadenumformer	92,5 %
Motorgenerator	89,5 %

Für 25 Perioden ist der Einankerumformer mehr im Vorteil, da würde der Wirkungsgrad, unter sonst gleichen Bedingungen, 96,5 % sein.

Sehr interessant ist der Vergleich der Kommutation einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine mit der eines Einankerumformers und eines Kaskadenumformers, und zwar müssen wir hier unterscheiden zwischen künstlicher Kommutation und Kommutation ohne besondere Hilfsmittel. Im letzteren Falle muss für eine Widerstandskommutation die E. M. K. (e_0), die bei konstanter Felderregung und stromlosem Anker vom Hauptfelde in der kurzgeschlossenen Spule induciert wird, gleich der Summe der EMK der Selbstinduktion (e_r) und der durch Rotation durch das Ankerquerfeld induzierten EMK (e_q) sein. Also: $e_0 = e_r + e_q$. Die EMK der Selbstinduktion (e_r) wird bei den drei hier in Betracht kommenden Maschinentypen in gleicher Weise berechnet, denn auch bei den Unformern ist die Stromänderung während der Kommutierungsdauer sehr annähernd gleich dem doppelten Werte des Stromes eines Ankerstromzweiges. Wir dürfen nämlich annehmen, dass der Wechselstrom während der Kurzschlusszeit, die ja im allgemeinen im Verhältnis zur Dauer einer Periode des Wechselstromes sehr klein ist, konstant bleibt.

Anders verhält es sich mit e_q. Bei der Gleichstrommaschine haben wir ein dreieckiges Ankerquerfeld, dessen Maximum in der neutralen Zone liegt. Bei den Umformern wird das resultierende Ankerfeld erzeugt von der Differenz der MMK*e* des Gleich- und Wechselstromes und zwar kommt für die Kommutation die resultierende Feldstärke in der Kommutierungszone in Betracht. Nun hat aber die MMK des Wechselstromes nicht dieselbe Kurvenform wie die MMK des Gleichstromes und ausserdem ändert sich erstere mit der Lage der Phasen relativ zu den Polen. Es bleibt deswegen in der Kommutierungszone eine MMK, die sich zeitlich ändert bei konstanter Belastung. Bei sechsphasigen Einankerumformern ergibt sich eine resultierende MMK, die zwischen 9 und 21 % der MMK des Gleichstromes ändert. Bei den Kaskadenumformern ist diese Aenderung viel kleiner, weil sie gewöhnlich 12-phasig ausgeführt werden.

Digitized by Google

Dennoch ist die Kommutation des Einankerumformers wesentlich günstiger, da die resultierende MMK in der Kommutierungszone bei den Kaskadenumformern etwa 58 % der MMK des Gleichstromes beträgt, da das Ankerquerfeld des generierten Stromes nicht durch ein entsprechendes entgegengesetzt gerichtetes und vom Wechselstrom erzeugtes Feld kompensiert wird.

Auch in dieser Beziehung liegt also der Kaskadenumformer mitten zwischen dem Gleichstromgenerator und dem Einankerumformer.

Anders jedoch verhält sich die Sache bei künstlicher Kommutation (Wendepolen). Durch die Wendepole, die vom Hauptstrome durchflossen werden, versucht man das Ankerquerfeld in der Kommutierungszone zu kompensieren und ausserdem eine der Selbstinduktionsspannung e_r gleiche aber entgegengesetzt gerichtete Spannung zu induzieren. Bei den Gleichstrommaschinen ist das nun ohne weiteres möglich, da das Ankerquerfeld nur vom Hauptstrome abhängt. Auch bei den Kaskadenumformern bieten sich in dieser Hinsicht keine Schwierigkeiten, da die zeitliche Aenderung der resultierenden MMK in der Kommutierungszone wegen der hohen Phasenzahl klein ist und prozentual gar nicht in Betracht kommt, da das konstante Glied, herrührend vom generierten Strom, verhältnismässig gross ist. Den Wendepolen der Einankerumformer hingegen muss man eine Amperewindungszahl, entsprechend dem *mittleren* Werte der MMK des resultierenden Ankerfeldes in der Kommutierungszone geben, und da das ganze Ankerquerfeld klein ist, wird die Abweichung der wirklichen Erregung der Wendepole von der erforderlichen in praktischen Fällen etwa $\pm$ 20 % (1). Die Zahl kann man nur klein halten durch eine Vergrösserung des Luftspaltes unter den Wendepolen, denn dadurch wird das Verhältnis der für die Erzeugung des Wendefeldes nötigen Amperewindungen zu den für die Kompensation des Ankerquerfeldes in der Kommutierungszone nötigen Amperewindungen möglichst gross. Immerhin sehen wir, dass, trotzdem Einankerumformer ohne künstliche Kommutation eine wesentlich bessere

(1) Vergl. " Die Kommutation von Einankerumformern „ von Dr. Ingenieur H. S. HALLO, E. T. Z. 31 Aug. 1911.

Digitized by Google

Kommutation aufweisen als Kaskadenumformer, das bei Wendepolumformern nicht mehr der Fall ist.

Hierin liegt eine Hauptschwierigkeit der Verwendung von Wendepolen. Dazu kommt noch, dass schon ein geringes Pendeln die Kommutation von Wendepolmaschinen sehr nachteilig beeinflusst. Pendelt der Umformer, so ändert das resultierende Ankerfeld seine Lage und kann somit nicht durch ein räumlich festes Wendefeld kompensiert werden. Ausserdem entsprechen beim Pendeln, und bei plötzlichen Belastungsstössen die Gleich- und Wechselstromamperewindungen des Ankers sich nicht mehr. Auch in dieser Hinsicht ist der Einankerumformer empfindlicher als der Kaskadenumformer, der ja nur zur Hälfte als Umformer arbeitet.

Aus obigen Gründen ist es leicht verständlich, dass sogar moderne Einankerumformer ohne Wendepole ausgeführt werden.

Berücksichtigen wir nun, das über Verluste und Kommutation gesagte, so ergibt sich, dass ein Einankerumformer viel grösser dimensioniert werden muss als das sonst der Fall wäre. Abgesehen von den Oberströmen, könnte die Leistung eines Einankerumformers 2,3 mal so gross sein als die Leistung derselben Maschine als Gleichstromgenerator. Es ist aber nicht möglich das Material derart auszunützen.

Bezeichnen wir als *Maschinenkonstante* den Wert $\frac{D^2 ln}{\sqrt{\nu}\,KW}\,10^{-4}$,

wo D = Durchmesser des Ankers in *cm*
l = ideelle Ankerlänge in *cm*
n = Tourenzahl in der Minute
KW = Leistung in Kilowatt

und ν das Verhältnis der Stromwärmeverluste eines Umformers zu denen eines gleichbelasteten Gleichstromgenerators, so muss dieser Wert für Einankerumformer viel grösser gehalten werden als für Kaskadenumformer und Gleichstromgeneratoren. Während wir bei grösseren Gleichstromgeneratoren Werte der Maschinenkonstante zwischen 35 und 25 (sogar 21 bei Maschinen mit Kompensationswicklung) finden, bleibt dieser Wert bei vielen Einankerumformern modernster Ausführung in der Nähe von 45 (sogar für Leistungen von etwa 1.000 KW). Für Kaskadenumformer können die Maschinenkonstanten, die bei Gleichstromgeneratoren üblich sind, eingehalten werden (berücksichtigend

Digitized by Google

$\sqrt{v}$). Wenn nun auch der Wert der Maschinenkonstante nicht ausschlaggebend ist für den Preis einer Maschine, so gibt sie doch einen gewissen Anhaltspunkt und erklärt die Tatsache, dass der Kaskadenumformer in vielen Fällen nur wenig teurer ist als der Einankerumformer mit Transformator.

Das ist besonders dann der Fall, wenn der Kaskadenumformer entsprechend seiner besseren Spannungsregulierung, ohne synchrone Zusatzmaschine ausgeführt werden kann, während der Einankerumformer mit einer solchen versehen werden muss.

Eine einfache Ueberlegung zeigt, dass Einankerumformer mit Zusatzmaschinen nicht gut mit Wendepolen ausgeführt werden können. Wir haben schon gesehen, dass Einankerumformer sich so wie so nicht besonders gut eignen für die Verwendung von Wendepolen. Durch die Hinzufügung einer Zusatzmaschine ändert sich jedoch die MMK des resultierenden Ankerfeldes in der Kommutierungszone in noch viel weiteren Grenzen. Die Zusatzmaschine arbeitet nämlich einmal als Motor, einmal als Generator. Diese Leistung wird vom Einankerumformer durch die Welle übertragen, also mechanisch geleistet oder aufgenommen. Deswegen fliesst ein Strom im Umformer, dessen MMK nicht durch einen entsprechenden Gleichstrom kompensiert wird. Zwar trifft das auch bei dem Kaskadenumformer zu, da schadet es jedoch weniger, weil die Aenderung prozentual kleiner ist, wie schon oben erläutert.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, dass die in der Gleichstromwicklung und in der Zusatzmaschine inducierten EMK*e* sich vektoriell addieren (bezw. subtrahieren, je nach der Erregung). Damit die Erreger- und Eisenverluste der Zusatzmaschine möglichst klein ausfallen, müssten die EMK*e* bei Leerlauf die gleiche Phase haben. Wegen der Verdrehung der Vektoren bei Belastung (hauptsächlich infolge der Quermagnetisierung), wird man jedoch die beiden Maschinen derart zusammenkuppeln, dass die Klemmenspannungen bei Belastung die gleiche Phase haben. Am einfachsten wird die Anordnung, wenn man das Magnetsystem der Zusatzmaschine drehbar lagert. Die günstigste Lage dieses Magnetsystemes ergibt dann sowohl den kleinsten positiven, als den kleinsten negativen Erregerstrom, entsprechend der motorischen bezw. generatorischen Wirkung der Zusatzmaschine.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Après avoir comparé les qualités les plus importantes des convertisseurs en cascade avec celles des moteurs-générateurs et des commutatrices, il est exposé que, dans beaucoup de cas, le rendement du convertisseur en cascade ne diffère que peu de celui de la commutatrice ordinaire, et que les premiers sont beaucoup plus aptes à l'utilisation des pôles auxiliaires que les dernières. Enfin, il se trouve, que la commutation des commutatrices, munies de pôles auxiliaires, est beaucoup plus délicate que la commutation des convertisseurs en cascade, quand on emploie des survolteurs pour le réglage de la tension du courant continu.

DISCUSSION

M. C. Sarli (Berlin) *compare entre eux les types de machines qui se disputent la préférence pour la transformation du courant alternatif en courant continu: les groupes moteurs-générateurs, les commutatrices et les convertisseurs en cascade.*

Abstraction faite des groupes moteurs-générateurs, qui trouvent toujours leur emploi, en dépit du prix d'achat plus élevé et du rendement moins avantageux, toutes les fois qu'il est nécessaire de s'opposer à de fortes variations de la tension du courant continu, l'ing. Sarli est convaincu que dans le plus grand nombre de cas, les commutatrices sont encore à préférer aux convertisseurs en cascade.

Le prix des premières est inférieur à celui des autres: quant au ren-

Digitized by Google

dement, il est hors de doute que celui des commutatrices est supérieur à celui des convertisseurs en cascade.

Le réglage de la tension du courant continu s'obtient dans les deux types de machines par les mêmes moyens.

L'inconvénient des oscillations pendulaires n'est pas plus grave dans les commutatrices que dans les convertisseurs en cascade et, d'ailleurs, il est à peine besoin de rappeler que pour l'un comme pour l'autre, il suffit de fixer rationnellement la durée de l'oscillation propre pour chaque machine, pour éviter la résonnance avec le réseau.

La mise en marche des commutatrices ne présente aucune difficulté, lorsqu'elles sont accouplées avec de petits moteurs de démarrage, ou encore à l'aide de courant alternatif par des moteurs asynchrones ou encore en les alimentant par des transformateurs de démarrage qui modifient la tension du courant dans les limites désirables.

L'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft construit des commutatrices jusqu'à 1500 Kw. et 50 périodes par seconde. La fabrication jusqu'à ce jour dépasse un total de 300.000 Kw.

M. E. EICHEL (Berlin) *fait observer que le convertisseur en cascade est en grande vogue en Allemagne: il rappelle que la Siemens Schuckert Werke a fourni des appareils de ce genre à la Métropolitaine de Berlin et pour les nouveaux tramways de Hambourg, ainsi que pour la Untergrundbahn de Schöneberg, etc.*

Les commutatrices (Einankerumformer) ont l'inconvénient de prendre beaucoup de courant au démarrage lorsque celui-ci s'effectue sur circuits à courant alternatif: on a cherché à attenuer cet effet (la General Electric, par exemple) en soulevant les balais pendant tout le temps du démarrage.

La Westinghouse fournit des commutatrices à 25 périodes par seconde jusqu'à 3000 Kw. Le démarrage peut se faire sur le courant alternatif en y employant un moteur auxiliaire (Système Dobrowolsky A. E. G. de Berlin).

La Edison New York C. a fourni des commutatrices à 50 périodes par seconde et à Los Angelos (Cal.) il y en a de 1500 Kw. à 50 périodes par seconde. Pour fréquences de 60 périodes par seconde on préfère les groupes moteur-générateur, et toutes les fois que les conditions locales obligent à rehausser le facteur de puissance de l'installation c'est au moteur synchrone qu'il faut avoir recours comme plus avantageux.

Le Docteur H. S. HALLO (Karlsruhe i. B) (par lettre). *Je remercie M. Feldmann qui a eu la complaisance de lire mon travail en mon absence et je remercie également MM. les Membres du Congrès qui ont bien voulu engager à son sujet une discussion sur laquelle je dois présenter les observations suivantes:*

Digitized by Google

Je partage l'opinion de M. Sarli, et j'admets avec lui que les moteurs-générateurs et les convertisseurs en cascades ont chacun leur champ d'action particulier, mais il me semble que dans l'idée de M. Sarli les avantages des commutatrices sur les convertisseurs en cascade sont quelque peu exagérés: s'il en était autrement on comprendrait difficilement pourquoi les convertisseurs en cascade continuent à se construire en nombre toujours croissant (aujourd'hui l'industrie en a absorbé pour plus de 150.000 Kw.).

J'observe, au surplus — et M. Eichel l'a déjà mis en évidence — que les usines Siemens-Schuckert, qui construisent indifféremment des commutatrices et des convertisseurs en cascade, donnent la préférence à ces derniers dans tous les cas importants.

Il est à propos de rappeler un fait tout à fait récent, celui de la Société d'Électricité de Stettino, qui fait installer le plus grand convertisseur en cascade qu'on ait construit jusqu'à ce jour (2000 Kw.) et deux autres de 1000 Kw. chacun. La tension du courant triphasé sera de 5000 Volt et la vitesse de rotation de 300 tours par minute.

Je renverrai qui voudra faire une étude comparative complète des types divers de groupes pour la conversion du courant à mon travail: " Die Eigenschaften des Kaskadenumformer und seine Anwendung „, qui a été publié par le Dr. et Ing. E. Arnold, dans le deuxième volume des travaux exécutés à l'Institut Électrotechnique de l'École Technique Supérieure Fridéricienne de Karlsruhe.

Digitized by Google

Il motore trifase a velocità variabile

avuto speciale riguardo alla condotta dei laminatoi e delle macchine a carta.

Rapporto sul tema N. II del Congresso.

Relatore Ing. C. SARLI (Berlino).

Fin dalle prime applicazioni del motore asincrono trifase fu avvertito lo svantaggio della regolazione della sua velocità per mezzo di resistenze inserite nel rotore. Coll'estendersi del suo campo d'azione andò sempre più accentuandosi il bisogno di avere un motore trifase la cui velocità fosse variabile come nei motori a corrente continua senza grande perdita di energia nelle resistenze, o, come suol dirsi, economicamente.

Alla soluzione di questo problema si addivenne per due vie: una diretta con la costruzione di motori polifasi a giri variabili " Motori a collettore „, l'altra indiretta, collegando il motore ordinario trifase con una macchina ausiliaria a velocità regolabile " Collegamento in cascata „.

I. — **Motori trifasi a collettore.**

Nel 1891 al Congresso di Francoforte il Goerges illustrò il funzionamento di un motore trifase, il cui rotore, avvolto come l'indotto di una ordinaria macchina a corrente continua, era

Digitized by Google

provvisto di collettore con tre spazzole per ogni paia di poli disposte a 120°. L'inventore indicò due metodi di connessioni: 1° L'avvolgimento dello statore e quello del rotore disposti in derivazione; 2° I due avvolgimenti disposti in serie. La regolazione dei giri avveniva per spostamento delle spazzole. Ma il motore a collettore del Goerges passò in dimenticanza, perchè a quel tempo l'attenzione degli elettrotecnici era tutta rivolta verso l'astro maggiore apparso contemporaneamente all'orizzonte, il motore asincrono trifase.

Nel 1901 i signori Winter & Eichberg brevettarono un sistema di regolazione di giri dei motori monofasi e polifasi a collettore (D. R. P. 153730). Ma anche allora gli elettrotecnici rivolsero maggiore attenzione al motore monofase, nel quale intravidero il motore adatto per la trazione; e del motore trifase non restarono che pregevoli trattazioni teoriche di diversi autori. Delle quali mentovo la più importante, quella del Prof. Blondel nell'" Éclairage électrique „ del 1903, nella quale l'autore, nel dare la teoria generale dei motori a collettore, tratta della compensazione del fattore di potenza che fu oggetto di studi del Heiland, e della regolazione dei giri.

Solamente in questi ultimi tempi il motore trifase a collettore è stato introdotto con successo nella pratica. Come fu indicato dal Goerges, lo statore di questo tipo di macchina è simile a quello di un ordinario motore asincrono trifase, mentre che il rotore è simile all'indotto di una ordinaria macchina a corrente continua. Il motore trifase a collettore è stato applicato tanto quale motore in derivazione, quanto come motore in serie.

a) *Motore in derivazione.*

Il motore in derivazione con la regolazione di giri sistema Winter & Eichberg [1] ed introdotto nella pratica dalla Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft funziona nella seguente maniera.

Come in un ordinario motore asincrono trifase, il campo dello statore induce nei singoli elementi dell'avvolgimento rotante forze elettromotrici la cui frequenza e grandezza variano in

---

[1] Vedi EICHBERG, *Ueber regelbare Drehstrom-Kollektormotoren.* E. T. Z., 1910, Heft 30, n. 31.

Digitized by Google

ragione inversa della velocità del rotore. Il collettore trasforma la frequenza delle f. e. m. indotte negli elementi di avvolgimento che in un dato istante fan capo alle spazzole, in frequenza del campo dello statore. Alle spazzole appaiono adunque f. e. m. di frequenza del campo dello statore e di grandezza variabile con la velocità del rotore. Grazie al collettore si ha la possibilità di poter collegare il rotore colla rete e d'imprimere alle

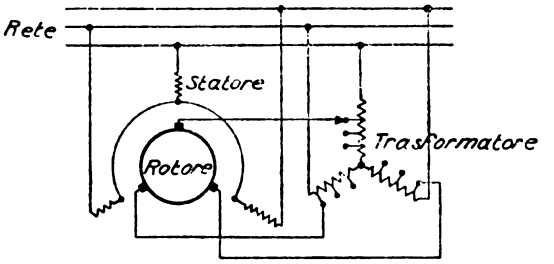


Fig. 1.

spazzole una f. e. m. esterna regolabile per mezzo di un qualsiasi trasformatore. Ad ogni valore di questa fa equilibrio una eguale f. e. m. interna indotta nell'avvolgimento del rotore, alla

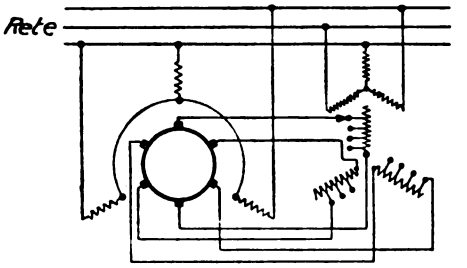


Fig. 2.

quale corrisponde un determinato scorrimento. Basta dunque variare la f. e. m. esterna per regolare la velocità del motore. Invertendo il senso della f. e. m. esterna, il motore a collettore raggiunge velocità superiori a quella del sincronismo.

La figura 1 rappresenta schematicamente il motore a collettore con 3 spazzole (collegamento a triangolo), la figura 2 indica il motore a 6 spazzole (collegamento diametrale o ad esagono).

Digitized by Google

b) *Motore in serie.*

Il motore in serie è indicato schematicamente nella figura 3. Le tre fasi dello statore fanno capo alle tre spazzole spostabili sul collettore. Le correnti che circolano nel rotore generano in

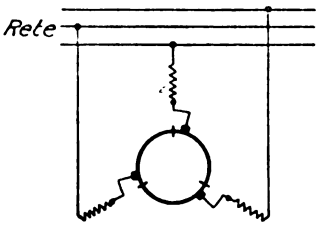


Fig. 3.

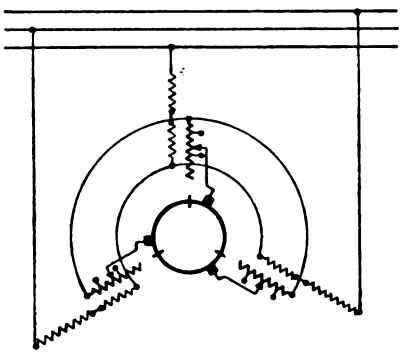


Fig. 4.

esso un campo rotante colla stessa velocità del campo dello statore, la cui posizione nello spazio relativa a quella del campo dello statore dipende dalla posizione delle spazzole. Quando queste sono disposte in direzione dell'asse magnetico " posizione fondamentale „ i due campi si elidono, il campo risultante e la coppia torcente sono eguali a 0. La coppia torcente è anche eguale a 0 quando le spazzole si trovano spostate di 180° rispetto all'asse magnetico dello statore. Per ogni altra posizione delle spazzole la coppia torcente è diversa da 0.

Alla tensione applicata ai morsetti del motore fanno equilibrio, astrazione fatta della caduta ohmica e di selfinduzione, le f. e. m. indotte nello statore e nel rotore. La velocità del motore è proporzionale al rapporto di queste f. e. m. indotte. Variando la posizione delle spazzole varia il detto rapporto e quindi anche la velocità del motore.

Nella figura 3 è indicato lo schema del motore con tre spazzole, ma nulla cambia in principio se invece di 3 se ne avessero 6 a collegamento diametrale. In figura 4 è indicato il motore come in figura 3 con l'aggiunta di un trasformatore in serie, che serve per ridurre la tensione al collettore.

Digitized by Google

c) *Motore doppio a collettore.*

Degno di nota è un terzo tipo di motore risultante dalla combinazione di due motori monofasi a collettore del Déri ed introdotto in pratica dalla Brown & Boveri (D. R. P. 223704). I rotori dei due motori sono calettati sullo stesso albero (fig. 5)

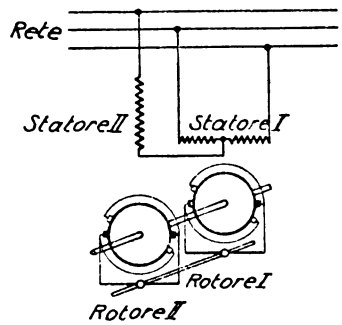


Fig. 5.

e gli avvolgimenti degli statori, a collegamento di Scott, sono inseriti sulla rete trifase. I collettori sono provvisti di un doppio sistema di spazzole, uno fisso e l'altro mobile. La regolazione di velocità avviene spostando contemporaneamente il sistema mobile delle spazzole. Il motore doppio a collettore ha le proprietà del motore monofase Déri.

Compensazione del fattore di potenza.

Come nel motore asincrono così nel motore a collettore la f. e. m. indotta nell'avvolgimento rotante è, a causa del disperdimento di flusso, spostata di fase rispetto alla tensione dello statore.

Regolando la velocità del motore a collettore colla variazione della f. e. m. esterna o collo spostamento delle spazzole, varia la grandezza della f. e. m. indotta e quindi quella della sua componente generante la corrente inerte del motore. Al di sopra del sincronismo la corrente inerte è spostata in avanti, perciò il fattore di potenza è di per sè alto. Ma al di sotto del sincronismo la corrente inerte è spostata indietro, perciò è ne-

Digitized by Google

cessario elidere completamente o in parte la detta componente, o, come suol dirsi, " compensare il fattore di potenza „, se si vuole che esso non sia molto basso.

Nel motore a regolazione Winter & Eichberg la compensazione si fa per mezzo del trasformatore di regolazione, col quale, oltre che la grandezza della f. e. m. esterna si regola anche la sua direzione, in modo da introdurre nell'avvolgimento rotante del motore a collettore una componente di f. e. m. che elida in tutto o in parte quella generante la corrente inerte. A questo scopo il secondario del trasformatore possiede oltre all'avvolgimento di regolazione un altro piccolo avvolgimento (avvolgimento di compensazione), e componendo la f. e. m. indotta in una fase dell'avvolgimento di regolazione con la f. e. m. indotta nella fase di diverso nome dell'avvolgimento di compensazione si ha la f. e. m. esterna della desiderata direzione da imprimere al collettore. Naturalmente, allo scopo di evitare connessioni complicate, si ha la completa compensazione solamente per determinate velocità.

Nel motore a collettore in serie la compensazione del fattore di potenza si raggiunge con la scelta opportuna del rapporto degli ampère-giri dello statore e del rotore, rapporto che si fa variare per mezzo di apposito trasformatore (trasformatore di compensazione).

II. — **Collegamenti in cascata.**

Il principio di condurre l'energia del rotore di un motore asincrono trifase, " energia di scorrimento „, ad una seconda macchina capace di utilizzarla fu dato dal Goerges e dallo Steinmetz, indipendentemente l'uno dall'altro, nel 1893, col cosiddetto " Collegamento in cascata „. La seconda macchina era un motore asincrono accoppiato meccanicamente col primo.

Questa disposizione, analogamente a quella dei motori a poli commutabili, per quanto applicata spesso con successo, permette solamente poche variazioni di velocità, senza dire che, per l'aumentato disperdimento del flusso, il fattore di potenza del primo motore è basso. Tale disposizione non può perciò soddisfare all'esigenze di molte macchine lavoratrici, le quali richiedono disposizioni capaci di regolare tra limiti più estesi ed in modo continuo la velocità.

Digitized by Google

Più tardi fu generalizzato il principio accennato, sostituendo al secondo motore asincrono altre macchine. L'Heyland (1) richiamò pel primo l'attenzione su questi nuovi sistemi di collegamenti che funzionano nel seguente modo. Gli anelli dell'indotto del motore principale di cui si vuol regolare la velocità sono connessi direttamente con un motore ausiliario a collettore, o indirettamente per mezzo di un convertitore con un motore ausiliario a corrente continua. Il motore ausiliario è capace di assorbire l'energia di scorrimento e di restituirla sotto forma di energia meccanica all'albero del motore principale, ovvero sotto forma di energia elettrica alla rete. Oltre a ciò il motore ausiliario è in grado di imprimere agli anelli del motore principale una forza contro-elettromotrice, la cui variazione, in dipendenza della variazione del campo che la genera, permette di regolare la velocità del motore principale. E finalmente spostando la fase della forza contro-elettromotrice è possibile di compensare il fattore di potenza del motore principale. Secondo che il motore ausiliario è un motore in derivazione, in serie o *compound*, il motore principale assume la caratteristica in derivazione in serie o *compound*.

Mettendo da banda le discussioni polemiche sulla priorità dei molteplici sistemi proposti, riferisco solamente su quelli introdotti con successo nella pratica. Essi si dividono in due categorie: la prima caratterizzata dall'accoppiamento meccanico del motore ausiliario col motore principale e dalla restituzione dell'energia all'albero di questa; la seconda caratterizzata dall'indipendenza meccanica del motore ausiliario dal motore principale e dalla restituzione dell'energia alla rete.

Alla prima categoria appartengono le seguenti due disposizioni:

a) Motore principale collegato ed accoppiato con un motore a collettore (D. R. P. 169453) (2). In figura 6 è indicata schematicamente la disposizione. M.A. motore principale, M.C. motore a collettore in derivazione, T. il trasformatore di regolazione di questo. Tutti i tipi di motori a collettori a giri variabili ed i metodi della loro regolazione sono qui applicabili.

---

(1) Vedi HEYLAND, *Die Verwendung der erweiterten Kaskadenschaltungen*, ecc. E. T. Z., 1908, Heft 14.

(2) Vedi KRAEMER, *Neue Methode zur Regelung von Asynchronmotoren*, ecc. E. T. Z., 1908, Heft 31.

Digitized by Google

La potenza del motore ausiliario è con sufficiente approssimazione:

$$L_2 = \frac{L_1 (s_1 - s_n)\, \eta_2}{1 - s_1}$$

dove L_1 rappresenta la potenza del motore principale, s_n il suo scorrimento normale, s_1 lo scorrimento corrispondente alla regolazione richiesta, ed η_2 il rendimento del motore ausiliario.

Il rendimento del gruppo in cascata è:

$$\eta = \eta_1 \left[(1 - s_1) + s_1\, \eta_2\right]$$

dove η_1 è il rendimento del motore principale.

b) Motore principale M.A. accoppiato con motore a corrente continua M.C.C., il quale riceve l'energia di scorrimento

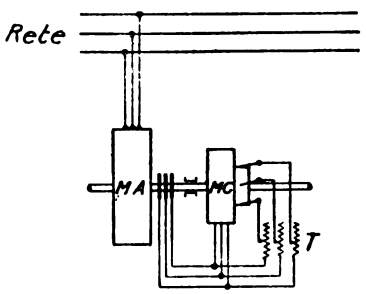


Fig. 6.

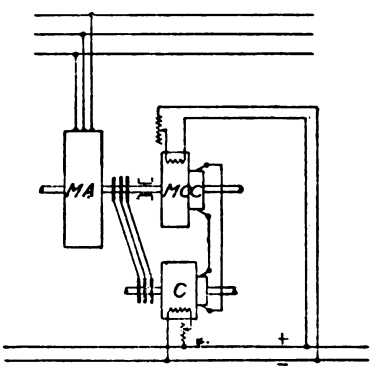


Fig. 7.

per mezzo del convertitore C. collegato col motore principale. Fig. 7 (D. R. P. 177270).

Il rendimento del gruppo è

$$\eta = \eta_1 \left[(1 - s_1) + s_1\, \eta_2\, \eta_3\right];$$

η_1 ed η_2 come nel caso *a)*, ed η_3 è il rendimento del convertitore.

Alla seconda categoria appartiene la seguente disposizione.

c) Motore principale M.A. collegato col motore ausiliario a collettore M.C. accoppiato a sua volta con un generatore

Digitized by Google

asincrono il quale restituisce alla rete l'energia di scorrimento. Fig. 8 (D. R. P. 179525) (1).

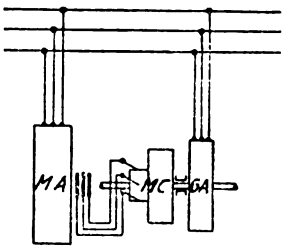


Fig. 8.

Il rendimento del gruppo in cascata è

$$\eta = \frac{1 - s_1}{\frac{1}{\eta_1} - s_1 \eta_2 \eta_4}$$

dove η_4 è il rendimento del generatore asincrono.

III. — **Considerazioni comparative ed applicazioni.**

Per ragioni costruttive ed economiche l'impiego dei motori trifasi a collettore è limitato per ora alle potenze piccole e medie. Tenuto conto di una soddisfacente commutazione e della coppia torcente d'avviamento, la potenza limite di questi motori è tra i 20 ed i 30 cavalli per polo, per la frequenza di 50. Diminuendo la frequenza la potenza per polo aumenta in corrispondenza.

Per le grandi potenze è necessario ricorrere ai collegamenti in cascata. Il motore a collettore è impiegato nei gruppi in cascata con vantaggio, perchè la sua potenza è limitata all'energia di scorrimento che si vuol ricuperare, la frequenza è bassa, e la tensione è indipendente da quella della rete. I collegamenti in cascata ad accoppiamento diretto del motore ausiliario col motore principale sono caratterizzati dall'avere potenza costante

(1) Vedi A. SCHERBIUS, *Ein neues System regelbarer Drehstrommotoren*, ecc. Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, 1910, Heft 6.

Digitized by Google

per qualunque velocità, mentre che negli altri la potenza diminuisce colla velocità. L'accoppiamento diretto del motore principale col motore a collettore come in fig. 6 fa sì che per le piccole velocità il motore a collettore risulti sproporzionatamente costoso; perciò per velocità inferiori a circa i 200 giri è preferibile la disposizione come in fig. 7. E nei casi in cui la potenza può diminuire colla velocità, e per velocità non superiori a circa i 200 giri, è applicabile con vantaggio la disposizione *c)* fig. 8, in cui si ha la libera scelta del motore ausiliario, del generatore asincrono e del loro posto d'installazione.

Per quanto riguarda i limiti di regolazione della velocità, in

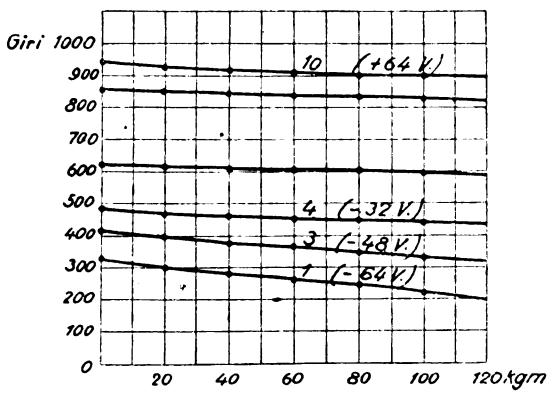


Fig. 9.

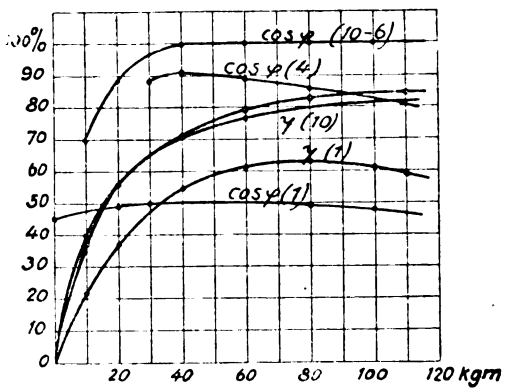


Fig. 10.

generale si può dire che per la regolazione al di sotto del 10-12 % è preferibile l'inserzione di resistenze nell'indotto del motore principale. E per regolazioni superiori al 50 % è preferibile il noto collegamento del Leonard.

I motori trifasi a collettore sono stati introdotti nella pratica pel comando di macchine utensili, ventilatori, macchine per filature, ecc. Per le macchine a carta, desiderandosi generalmente una regolazione di velocità tra limiti molto estesi, da 1 : 5 sino a 1 : 13, sembra che il motore a collettore non possa rivaleggiare col noto collegamento di Hollertzug e colle altre disposizioni a corrente continua.

L'Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft ha costruito da quasi due anni molti motori a collettore in derivazione ed in serie per potenze da 5 a 100 cav. La Siemens-Schuckert costruisce il motore in serie, e la Brown-Boveri il motore doppio.

In figg. 9 e 10 sono indicate le curve caratteristiche di un

Digitized by Google

motore in derivazione per diversi valori della f. e. m. esterna. Il motore è a 12 poli, 50 periodi, 500 volts, regolabile tra 300 e 900 giri a potenza costante di 50 cav. Esso serve pel comando di una macchina utensile. Allo scopo di rendere meno costoso l'apparecchio di regolazione del motore in derivazione la A. E. G. fa a meno del trasformatore di regolazione e provvede l'avvolgimento dello statore di morsetti di congiunzione colle spazzole in modo che l'avvolgimento funziona anche da auto-trasformatore per la regolazione della tensione al collettore.

In fig. 11 sono indicate le caratteristiche dei giri di un motore in serie accoppiato con macchina per filatura. Esso è a 6 poli per 600/1200 giri, 5/10 cav., 150 volts. Le curve sono tracciate per diversi spostamenti di spazzole.

I gruppi in cascata sono stati applicati per i laminatoi e ventilatori. Per i laminatoi pesanti non reversibili, i quali devono girare a piccola velocità a vuoto, e celeremente a pieno carico, le disposizioni in cascata sono capaci di adattarsi a tutte le condizioni di lavoro, mentre che queste sono difficilmente raggiungibili con la regolazione per mezzo di resistenze.

Nelle figg. 12 e 13 sono indicate le curve caratteristiche di un gruppo in cascata con motore a collettore, fig. 6. La cascata è per 680 cav. regolabile tra 270 e 190 giri. Il motore principale è a 22 poli, il motore a collettore è a 8 poli e della potenza di circa 180 cav. Il gruppo serve pel comando di un laminatoio.

Nelle figg. 14 e 15 si hanno le curve caratteristiche di un gruppo in cascata con motore a corrente continua secondo lo schema della fig. 7. Il motore principale è di 1000 cav. a giri regolabili tra 115 e 80. I giri sincroni sono 125. La cascata è accoppiata con un laminatoio.

Nella fig. 16 sono indicate le curve del gruppo in cascata con motore a collettore come in fig. 8. Il motore principale è accoppiato con un ventilatore. La potenza è di 1000 cav. a 363 giri e di 370 cav. a 268 giri.

I primi due gruppi sono stati eseguiti dall'A. E. G., il terzo dalla Brown & Boveri. Queste due ditte sono in possesso dei 3 mentovati brevetti.

Finalmente dirò di un'altra applicazione importante dei gruppi in cascata accoppiati con masse rotanti. Essa consiste nell'egualizzare senza perdita le variazioni subitanee dell'energia erogata dalla rete del motore di comando. Nella nota disposizione del-

Digitized by Google

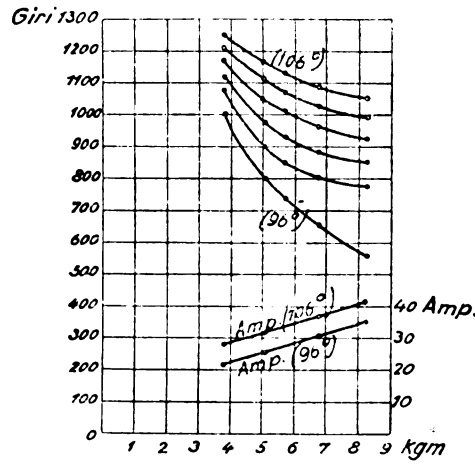


Fig. 11.

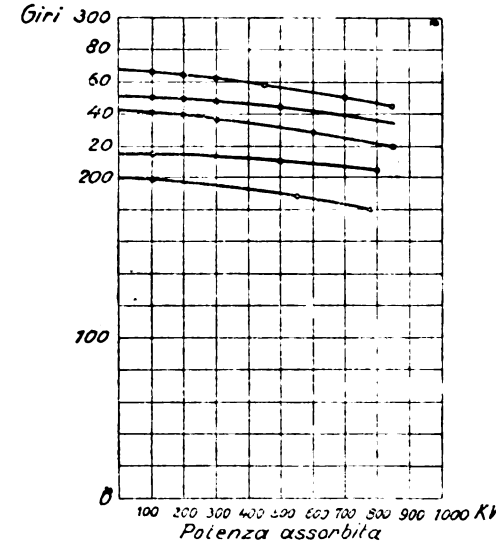


Fig. 12.

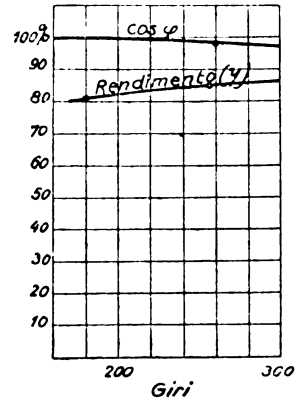


Fig. 13.

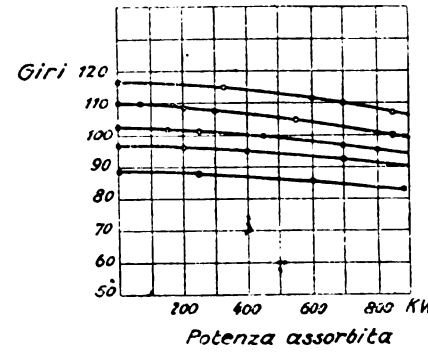


Fig. 14.

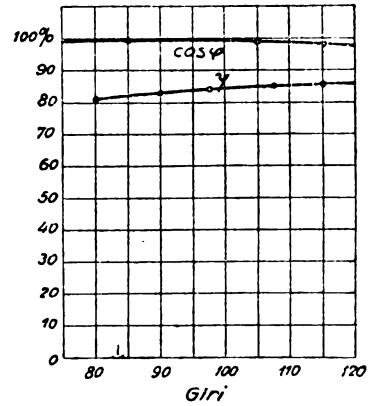


Fig. 15.

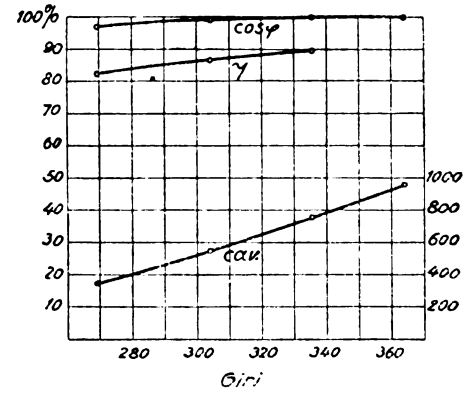


Fig. 16.

Digitized by Google

l'Ilgner pel comando di macchine a estrazione l'energia corrispondente allo scorrimento del motore necessaria per la scarica della massa volante va perduta in resistenze, mentre che essa coll'impiego della cascata può essere ricuperata.

Presso la A. E. G. è in lavoro un tale gruppo Ilgner dove il motore principale per 2500 cav. 430 giri con 23 % di scorrimento è accoppiato con un motore a collettore a 4 poli e per 500 cav.

Ma oltre alla detta disposizione il gruppo in cascata accoppiato con la massa volante può essere impiegato libero, indipendente dalla macchina lavoratrice (egualizzazione in parallelo) (D. R. P. 217766). Il motore a collettore offre al motore principale, col quale è accoppiato, la possibilità di farlo funzionare per la data variazione di velocità corrispondente all'utilizzazione della massa volante, da motore o da generatore, in modo da restituire alla rete nei momenti di maggior consumo l'energia accumulata nel periodo di minor carico.

Un impianto secondo questo sistema fu annunziato lo scorso anno in esecuzione presso la Brown & Boveri per la sottostazione del Moncenisio. Si hanno tre gruppi di motori-generatori di 2500 cav., trasformanti la frequenza di 50 in quella di 25. I gruppi sono accoppiati con masse volanti, mentre che il motore principale è in cascata con un motore a collettore, il quale restituisce all'albero l'energia corrispondente allo scorrimento del 20 %.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Le problème du réglage économique de la vitesse des moteurs triphasés a été résolu de deux façons distinctes: 1° par la construction de moteurs triphasés à collecteurs; 2° par le montage dit en " cascade „.

Après quelques brèves données sur le moteur triphasé à collecteur de Görges, l'Auteur décrit le système Winter-Eichberg (a) *de réglage de la vitesse d'un moteur triphasé à collecteur, en dérivation. Ce système consiste dans l'application, aux balais, d'une f. é. m. extérieure, que l'on fait varier, suivant les besoins, au moyen d'un transformateur, et qui sert à régler la vitesse du moteur.*

Il fait ensuite une brève description (b) *du moteur en série et de son mode de réglage; puis il signale* (c) *le double moteur à collecteur de Brown-Boveri qui n'est autre chose qu'une combinaison de deux moteurs Déry monophasés à collecteur.*

Enfin il mentionne la méthode de la compensation du facteur de puissance dans les moteurs en dérivation (système Winter-Eichberg) et dans les moteurs en série.

Dans un deuxième chapitre, l'auteur décrit les trois montages en cascade récemment introduits dans la pratique. Ce système consiste en une utilisation de l'énergie du moteur principal que l'on dirige sur une seconde machine, à vitesse réglable, qui la restitue, soit sous la forme d'énergie mécanique, à l'arbre du moteur principal, soit au réseau de distribution, sous la forme d'énergie électrique:

a) *la seconde machine est un moteur à collecteur directement accouplé au moteur principal;*

b) *la seconde machine est un moteur à courant continu auquel l'énergie* de glissement *est transférée au moyen d'un convertisseur;*

c) *la seconde machine est un moteur à collecteur accouplé à un générateur asynchrone qui fait passer au réseau de distribution l'énergie* de glissement.

Le troisième chapitre est spécialement consacré à des considérations comparatives entre les divers systèmes. L'Auteur y fait observer que les moteurs triphasés à collecteurs sont actuellement réservés aux faibles

Digitized by Google

puissances et aux puissances moyennes, tandis que pour les gros débits, tels, par exemple, ceux que réclament les laminoirs, on a plus volontiers recours aux montages en cascade.

Enfin, après quelques données sur les machines déjà construites et la production de leurs courbes caractéristiques, l'Auteur conclut en indiquant l'application des groupes montés en cascade et reliés à des masses en rotation qui fonctionnent comme des égalisateurs d'énergie.

DISCUSSION

M. R. LEGOUEZ (Paris) *parle sur la puissance par pôle de ces machines, et* M. C. PALESTRINO (Turin) *sur leur commutation, laquelle n'est pas seulement satisfaisante, mais absolument parfaite, car dans le rotor des moteurs de ce type il n'y a pas, à proprement parler, un champ alternatif, mais un véritable champ tournant: par suite sont éliminés les champs pulsatoires alternatifs et, avec eux, l'écueil de la commutation.*

M. SARLI *répond qu'il a employé le qualificatif " satisfaisant „ dans un sens général, entendant dire par là que dans les moteurs à collecteur, destinés à permettre les variations de la vitesse, la commutation est très bonne pour certaines vitesses mais on ne peut pas dire qu'elle le soit dans les démarrages avec courants importants. Il dit savoir qu'on a construit de ces moteurs même pour 600 HP.*

Digitized by Google

MOTEURS POLYPHASÉS A COLLECTEUR

R. Legouëz (Paris)
Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

Conformément aux plus récents progrès en électrotechnique on peut concevoir la commande des laminoirs, soit par des moteurs polyphasés à collecteur direct, soit par des moteurs d'induction ordinaires à bagues, avec lesquels on monte en cascade une machine à collecteur.

Notre communication concerne la commande par moteurs à collecteur direct. Ceci nous conduit à donner des explications générales sur les moteurs à collecteur.

Historique.

Les moteurs à collecteur pour courants polyphasés ont été décrits pour la première fois dans le brevet anglais N° 18525 du 18 Décembre 1888 de Wilson, et dans le brevet allemand N° 61951 du 21 Janvier 1891 de Rotten.

M. le Professeur Görges fit, en outre, au Congrès de Francfort en 1891 une Conférence remarquable sur ces moteurs, souvent rappelée au cours de ces dernières années. Cette conférence donnait déjà en 1891 une description et une explication détaillées du fonctionnement du moteur avec connexion série. Il faut noter que cette connexion série, qui consiste à monter le stator en étoile et à fermer cette étoile en polygone sur le rotor, était contenue dans le brevet Rotten, mais non dans le brevet Wilson.

Digitized by Google

Dans le brevet Wilson il était question de disposer éventuellement des enroulements en court-circuit sur le rotor, pour donner dans certains cas au moteur une tendance à se fixer à une vitesse sensiblement synchrone, mais aussi bien dans le brevet Wilson que dans le brevet Rotten les inventeurs entendaient faire travailler leurs moteurs en dehors de la sujétion d'une vitesse liée à la fréquence des courants d'alimentation.

Devant l'extension rapide du moteur d'induction sans collecteur, ces moteurs à collecteurs attirèrent peu l'attention générale et vers 1900 leur existence n'était même pas signalée dans les cours les plus détaillés des écoles techniques, de telle sorte que c'est parmi l'ignorance à peu près générale des brevets Wilson et Rotten et de la conférence Görges que M. Latour prit ses brevets sur les machines à collecteur pour courants polyphasés en 1900 et 1901.

M. Latour, en étudiant ces machines, découvrit que la sujétion du synchronisme s'y manifestait aussi bien que dans les autres types de moteurs, mais sous une forme nouvelle et originale.

Les conditions de commutation parfaite se trouvaient en effet liées à celles d'une vitesse sensiblement synchrone. La mauvaise commutation devait intervenir dans ces machines pour un *écart de vitesse* par rapport à la vitesse synchrone absolument comme elle intervient dans les machines à courant continu pour un écart d'angle par rapport à l'angle de calage donnant la commutation parfaite.

M. Latour fut donc naturellement conduit à considérer ces machines dans un autre esprit que les précédents inventeurs et à se distinguer de ces derniers en faisant travailler systématiquement ces machines dans les conditions rationnelles d'un fonctionnement sensiblement synchrone (brevet français N° 306229 de Décembre 1900 et brevets allemands N° 152796 d'Avril 1901 et N° 154509 de Septembre 1901). Il ajoutait en outre, à la connexion shunt et à la connexion série, la connexion *compound*, qui constitue à proprement parler la connexion universelle, et imaginait la multiplication des phases pour l'alimentation du rotor (brevet allemand N° 145433 de Septembre 1901).

Enfin M. Latour découvrait le principe d'auto-excitation (et de compensation) des machines polyphasées à collecteur.

Indépendamment, M. Heylaud reprenait le moteur à collecteur avec enroulements en court-circuit sur le rotor (Wilson) et

Digitized by Google

montrait tout l'intérêt et toute l'originalité de cette combinaison (E. T. Z., Juillet 1901).

Par l'article de M. Heylaud l'attention des électriciens fut aussitôt portée sur les moteurs à collecteur que l'on avait oubliés.

La tendance se manifesta tout de suite de ne pas trop se soucier comme M. Latour des difficultés de commutation que pourrait présenter un fonctionnement étranger au synchronisme, et d'établir des moteurs ayant précisément l'avantage de marcher à une vitesse quelconque, sans rapport avec la fréquence du courant d'alimentation. C'était reprendre les brevets Wilson et Rotten.

MM. Winter-Eichberg en Allemagne (Novembre 1901) et M. Roth en France (Octobre 1902) ont fait breveter, dans le cas où le stator et le rotor d'un moteur Wilson sont montés en parallèle avec l'interposition d'un transformateur (transformateur envisagé déjà par M. Latour dans son D. R. P. 145433 de Septembre 1901), le procédé qui consiste à modifier le rapport de transformation de ce transformateur pour modifier la vitesse.

Mais en réalité, dans la pratique, on est bien conduit à régler la vitesse des moteurs à collecteur de façon à obtenir, conformément aux idées de M. Latour, le synchronisme comme régime moyen et à ne pas s'écarter de cette vitesse d'une façon excessive.

Les applications aux laminoirs que nous devons considérer ici conduisent, par exemple, à un moteur Latour à caractéristique Compound, n'admettant pas un glissement positif ou négatif de plus de 15 %. Avant de présenter ce type de moteur nous devons développer ici la notion de ce que M. Latour appelle la " commutation cage d'écureuil „, mode de commutation qui doit assurer le succès industriel des machines à collecteur.

Commutation cage d'écureuil.

On dira qu'on a une commutation cage d'écureuil lorsque, quelque soit le déplacement angulaire du collecteur, il reste, à tout moment, au moins une section en court-circuit par encoche.

La fig. 1 fera bien comprendre notre pensée (1). Elle représente

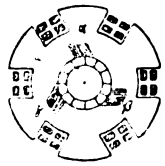
(1) Voir les Communications de M. Latour à l'" American Institute of electrical Engineers „ (Juin 1903).

Digitized by Google

un enroulement tambour à 12 sections distribuées dans 6 encoches, 3 balais à 120° reposent sur le collecteur, et la largeur de ce balais est plus grande que celle d'une lame. Dans ces conditions, on voit que, par couple d'encoches opposées, on compte 4 sections, dont une au moins est en court-circuit, que ce soit tantôt sous le balai α, tantôt sous le balai β, tantôt sous le balai γ. On a alors une commutation cage d'écureuil, c'est-à-dire que si on néglige les fuites entre les sections situées dans les mêmes encoches, on doit considérer que les courts-circuits sous balais ne sont jamais rompus et que les courants de court-circuit passent totalement d'une section à l'autre sans donner lieu a des étincelles de rupture. On pourrait sans doute avoir des courants de court-circuit exagérés si les forces électromotrices en jeu dans les sections en court-circuit étaient trop élevées, mais l'effet de self des sections disparaît et la commutation se trouve très facilitée.

Le nombre des balais étant impair, on voit que le nombre d'encoches doit être, au plus, double du nombre des balais.

Fig. 1



Suivant le principe représenté par la fig. 1, on réalise pareillement la commutation cage d'écureuil avec 5 balais à 72° et un nombre maximum d'encoches égal à 10, avec 7 balais à $51° \frac{3}{7}$ et un nombre maximum d'encoches égal à 14, avec 9 balais à 40° et un nombre maximum d'encoches égal à 18.

Si, au lieu de 3, 5, 7, 9 balais, on en dispose le double de ces nombres: 6, 10, 14, 18, on doit encore respecter les nombres maxima d'encoches de 6, 10, 14, 18; mais, au lieu d'avoir au moins une section en court-circuit par couple d'encoches opposées, on en a au moins deux qui voisinent en profondeur, et on a une commutation cage d'écureuil encore plus parfaite.

Partant du nombre de balais sur le collecteur, on peut dire que l'on a la commutation cage d'écureuil:

Digitized by Google

1° lorsque le nombre de balais est impair, si le nombre d'encoches par pôle est au plus égal au nombre de balais;

2° lorsque le nombre de balais est pair, si le nombre d'encoches par pôle est au plus égal à la moitié du nombre de balais.

Dans ce qui précède, on a supposé qu'il était question d'une machine bipolaire. Dans le cas d'une machine multipolaire, on envisagera le cas d'un enroulement imbriqué avec connecteur Mordey et le nombre de balais devra être, bien entendu, rapporté à ce qu'il serait dans une machine bipolaire correspondante.

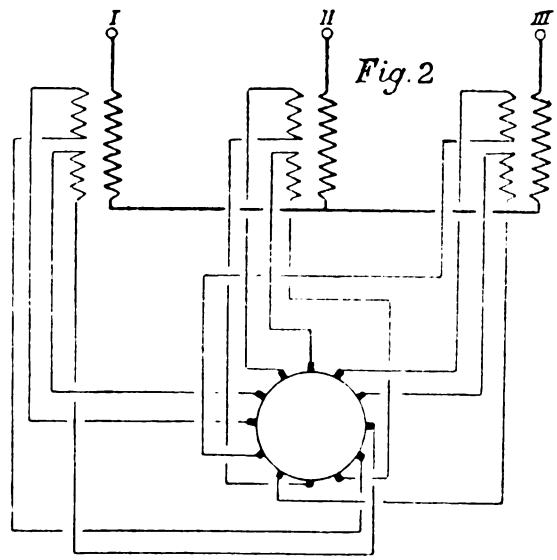


Fig. 2

Dans les machines polyphasées à collecteur, on obtient un nombre de balais sur le collecteur égal au nombre de phases dont on se sert pour l'alimentation du rotor. Dans le brevet allemand N° 145433 de 1901, par lequel M. Latour remettait à l'ordre du jour les machines à collecteur pour courants polyphasés, M. Latour a prévu la multiplication des phases pour l'alimentation des rotors à collecteur. C'était là une innovation remarquable.

La transformation de 3 phases en 6 phases est bien connue.

Une transformation donnant lieu à 12 balais sur le collecteur est représentée par la fig. 2. On a deux secondaires semblables sur le transformateur au lieu d'un seul, et l'alimentation par

Digitized by Google

phase se fait suivant deux cordes parallèles distinctes au lieu de se faire suivant un diamètre.

Une transformation donnant lieu à 9 balais est représentée sur la fig. 3. On dispose par phases deux secondaires *a* et *b*, dont les nombres de spires sont comme les nombres 23 et 28. Les secondaires *a* donnent, en leur milieu, les trois bornes secondaires 1, 4, 7. Les secondaires *b* sont partagés dans les proportions $6 + 16 + 6 = 28$ de façon à donner chacun deux bornes secondaires 2-3, 5-6, 8-9. On vérifie facilement que, tout en employant un transformateur du type usuel, on a ainsi converti 3 phases en 9 phases. On aboutit en effet, dans la représentation par

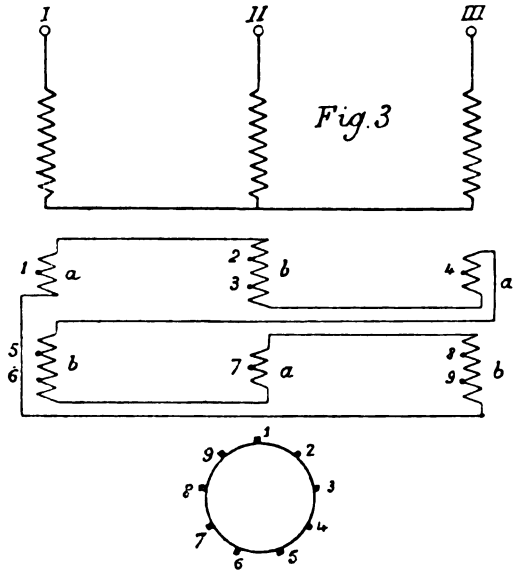


Fig. 3

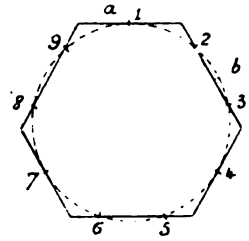


Fig. 4

secteurs, au polygone irrégulier représenté par la fig. 4, dont les petits côtés (secondaires *a*) sont tangents à un certain cercle et les grands côtés (secondaires *b*) coupent ce même cercle en deux points, de façon que l'on dispose sur la circonférence du cercle considéré de 9 points équidistants 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Comme application d'une alimentation à 12 balais donnant lieu à une commutation cage d'écureuil, nous citerons, entre autres, un des moteurs triphasés système Latour installés par la Société Kolben de Prague (Mines de Hongrie). Ce moteur est de 240 HP (42 périodes) à 14 pôles, et le rotor comporte 84 encoches. Sans connecteur Mordey, on devrait avoir $7 \times 12 = 84$

Digitized by Google

lignes de balais; mais, en réalité, par suite de la présence d'un connecteur Mordey, on aboutit à 12 lignes de balais équidistantes, conformément à la fig. 5.

Comme application d'une alimentation à 9 balais donnant lieu à une commutation cage d'écureuil, nous citerons, entre autres, un des moteurs triphasés système Latour installés par les Ateliers de Jeumont aux Mines de l'Escarpelle (France). Il s'agit de moteurs triphasés de 225 HP (50 périodes) à 8 pôles ayant 72 encoches sur le rotor. Grâce à un connecteur Mordey on aboutit encore à 9 lignes de balais équidistantes.

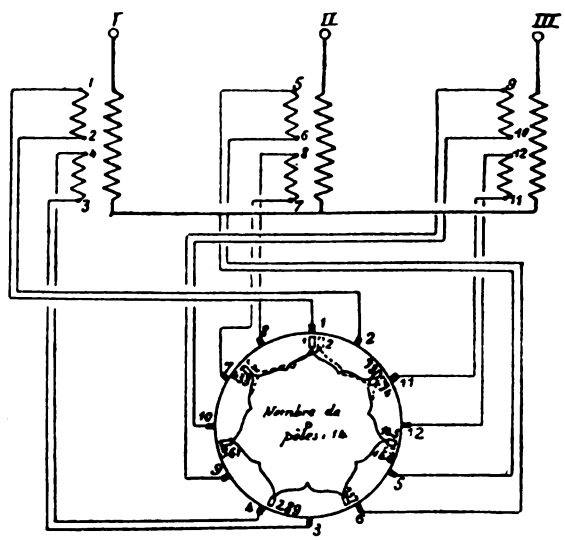


Fig. 5

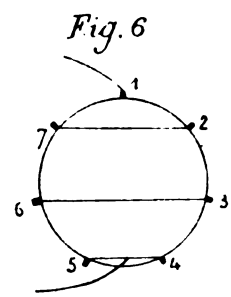


Fig. 6

Dans le cas des machines pour courant monophasé avec balais en court-circuit, on peut arriver à obtenir la commutation cage d'écureuil en multipliant le nombre de cordes de court-circuit conformément à un brevet allemand Latour N° 1542174. En général, on dispose ainsi d'un grand nombre pair de lignes de balais, mais on peut, en réalité, utiliser un nombre impair de balais (7 par exemple) avec la disposition de la fig. 6 (7 balais, 7 encoches par pôle). Le nombre 7 a l'avantage de donner toujours lieu à 7 lignes de balais équidistantes pour les nombres de pôles les plus usuels (4, 6, 8).

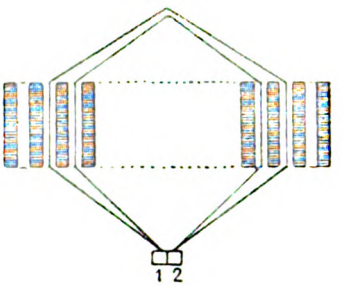
Enfin au lieu d'agir par le nombre de balais sur le collecteur

Digitized by Google

on peut, pour obtenir la commutation cage d'écureuil, imaginer des enroulements spéciaux.

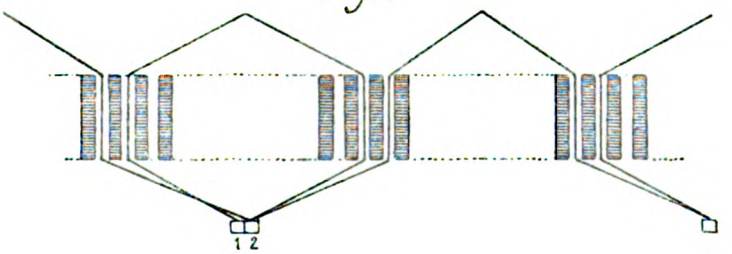
Ainsi, au lieu d'un seul enroulement imbriqué, on peut disposer deux enroulements imbriqués montés en parallèle sur les mêmes lames du collecteur et distribués dans des encoches voisines, ainsi que le représente la fig. 7. Avec cette disposition, on peut, toutes choses égales d'ailleurs, admettre un nombre d'encoches

Fig. 7



par pôle double de ce qu'il doit être avec un ensoulement ordinaire. La commutation cage d'écureuil subsiste. Les tensions développées dans les sections en dérivation sur les mêmes lames sont très sensiblement les mêmes, et les courants de circulation ne sont pas à redouter.

Fig. 8



On peut enfin combiner un enroulement imbriqué avec un enroulement série-parallèle d'ordre convenable (Latour-Perret) ainsi que le représente la fig. 8. Cette disposition a l'avantage appréciable de rendre inutile le connecteur Mordey. On peut dire que l'enroulement ondulé sert de connecteur Mordey à l'enroulement imbriqué et que, inversement, l'enroulement imbriqué sert de connexions équipotentielles à l'enroulement ondulé.

Digitized by Google

La complication d'un double bobinage est compensée par la suppression du connecteur Mordey ou des connexions équipotentielles et on obtient la commutation cage d'écureuil dans des conditions pratiques et économiques.

A titre d'exemple des moteurs comportant des enroulements spéciaux, nous citerons le moteur triphasé système Latour installé aux Mines de Bascoup (Belgique) par les Ateliers de Charleroi. Il s'agit d'un moteur de 350 HP. (50 périodes) avec alimentation hexaphasée par 6 balais seulement.

La conclusion qui s'impose à la vue du fonctionnement de ces différentes machines est que la commutation cage d'écureuil est d'un grand intérêt pour les machines à collecteur pour courants alternatifs. Nul doute que tous les constructeurs ne cherchent, dans un avenir prochain, à obtenir ces conditions de commutation remarquables.

Les conditions de commutation à vérifier dans les machines à collecteur étant ainsi précisées, nous exposerons le mode particulier de réalisation adopté par les Ateliers de Constructions électriques de Jeumont (Perret), pour un moteur compound système Latour en vue de son application à la commande des laminoirs.

Lorsqu'on applique la commande par courants alternatifs aux puissants appareils à travail intermittent tels que les laminoirs, on adopte le plus souvent une attaque par moteur asynchrone combiné avec un volant, et pour permettre à ce dernier d'intervenir comme régulateur, on provoque automatiquement des variations de vitesse au moyen de résistances introduites dans le circuit du rotor. Un tel dispositif comporte toutefois l'inconvénient d'entraîner une perte sensible d'énergie dans les résistances.

La commande par moteurs à courants alternatifs à collecteur ne présentent pas cet inconvénient, puisque ces machines se prêtent à un réglage de la vitesse sans perte d'énergie dans les rhéostats.

On adopte un moteur alternatif série, sur le collecteur duquel est dérivé un circuit auxiliaire comprenant une tension fixe et une impédance variable (motor compound) (Latour-Heyland). L'arrangement est tel que si cette impédance est nulle, le moteur est shunt et que si, au contraire, elle est infinie (circuit auxiliaire ouvert) le moteur est série.

La fig. 9 représente schématiquement un moteur triphasé agencé suivant l'invention.

Digitized by Google

Le stator 1, connexé au réseau R, est d'autre part relié en série avec le rotor 2; le circuit auxiliaire dérivé sur le rotor comprend l'impédance variable 5 et une tension fixe fournie par l'enroulement secondaire 3 d'un transformateur statique dont le primaire 4 est connexé au réseau R.

L'impédance 5 peut être constituée par une résistance, par une self, par une self combinée avec une résistance. Le transformateur 3-4 est de préférence un transformateur à champ tournant comprenant un rotor décalable dans un stator, de façon à permettre un réglage convenable de la phase de la tension dérivée.

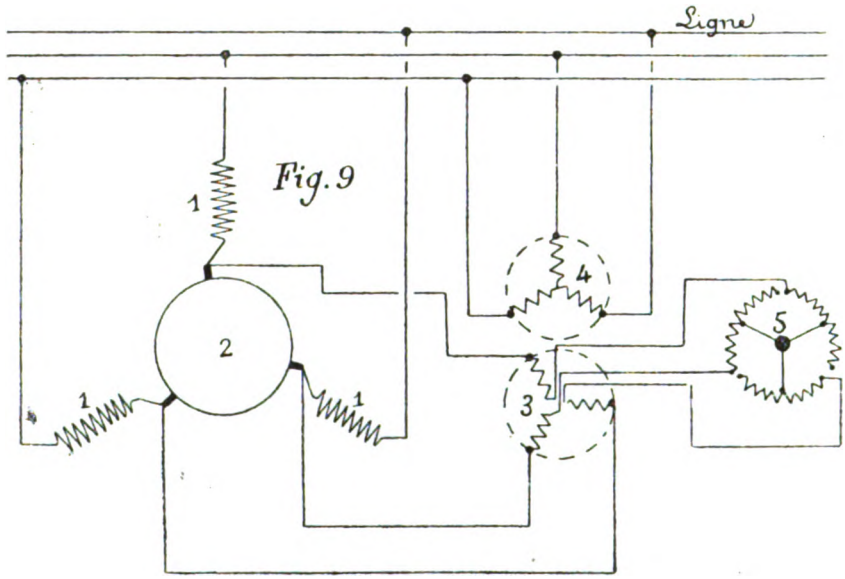


Fig. 9

Le moteur est établi pour que sa vitesse V2 en connexion série à pleine puissance, soit inférieure à sa vitesse V1 en connexion shunt. Pour toute valeur de l'impédance 5, comprise entre 0 et Z, on a en pleine charge une vitesse comprise entre V1 et V2, et pour faire varier la vitesse en pleine charge il suffit donc de faire varier cette impédance 5.

Ce système permet d'obtenir un bon rendement et un bon facteur de puissance aux régimes extrêmes ainsi qu'aux régimes intermédiaires. Il est utile de remarquer que la puissance en jeu dans le circuit dérivé est toujours faible et que les organes auxiliaires sont relativement peu importants.

Digitized by Google

Le système fonctionne de la façon suivante:

A vide, l'impédance 5 est court-circuitée, par suite le moteur est shunt, et sa vitesse est bien déterminée.

Lorsque le laminoir commence son opération, la puissance absorbée par le moteur s'élève d'abord en même temps que la puissance développée sans modification sensible dans la vitesse grâce à la caractéristique du moteur shunt; mais à partir du moment où la puissance développée atteint une certaine limite,

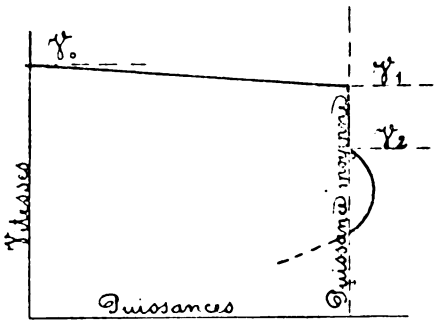


Fig. 10

que l'on choisit pour correspondre à la puissance moyenne en travail normal, l'impédance 5 est augmentée automatiquement: un ralentissement du moteur s'ensuit et le volant, intervenant à ce moment, restitue une partie de son énergie vive. Dans ces conditions, on obtient évidemment une régularisation de la puissance absorbée.

Lorsque le laminoir est parvenu à sa période de repos, une action inverse s'exerce et la puissance fournie au moteur sert à ramener le volant à sa vitesse initiale.

La caractéristique de la vitesse du moteur en fonction de la puissance absorbée a l'allure du diagramme montré par la fig. 10. Le fonctionnement normal a lieu à puissance constante, entre les vitesses V1 et V2, et dans une marche prolongée à vide la vitesse ne dépasse pas une valeur V0 très peu supérieure à V1.

Pour réaliser un réglage automatique de l'impédance variable 5 on peut utiliser différents moyens; par exemple, un servo-moteur commandé par le courant, à l'aide d'un relais; suivant que l'intensité absorbée par le moteur du laminoir est inférieure ou supérieure à l'intensité moyenne, le servo-moteur est mis en

Digitized by Google

marche dans un sens ou dans l'autre et augmente ou diminue l'impédance de telle sorte que l'intensité se maintient à peu près constante.

Évidemment, on peut faire intervenir la puissance, ou encore la vitesse, etc.... pour atteindre le même but.

Par les exemples que nous avons donnés on peut se rendre compte qu'it est possible de construire des moteurs de très-grande puissance fonctionnant parfaitement. La multiplication des phases, la commutation cage d'écureuil prévues par M. Latour sont d'un grand secours.

Digitized by Google

Il problema del raffreddamento nei trasformatori di media grandezza

Rapporto sul tema N. 8 del Congresso.

Relatore Ing. GIAMPIERO CLERICI (Milano).

Il problema del raffreddamento dei trasformatori di media potenza riguarda trasformatori per tensioni primarie non molto elevate (da 2000 a 15.000 volt) e per potenze pure limitate (da 10 a 300-400 KVA), destinati alle reti delle Società che distribuiscono energia elettrica. Sono quindi macchine che devono funzionare sparse nelle numerose cabine di una rete di distribuzione, cabine in generale assai lontane dalla centrale elettrica, con mezzi di comunicazione difficili e quindi difficilmente ispezionabili. Malgrado ciò, questi trasformatori devono compiere un esercizio importante, essendo loro affidata l'illuminazione pubblica e privata della regione circostante e durante la giornata l'alimentazione di stabilimenti industriali.

Non trattiamo dei trasformatori per potenze e per tensioni più elevate, i quali o si trovano nelle Centrali, o si trovano in sotto-stazioni primarie e quindi sempre sotto la sorveglianza di tecnici delle Società.

Si tratta di vedere se per i trasformatori di cui trattiamo, convenga il tipo a secco o il tipo in olio.

Riguardo al tipo a ventilazione forzata, non è il caso di oc-

Digitized by Google

cuparsene, perchè si esclude facilmente per le ragioni che diremo in seguito.

I pareri al riguardo sono enormemente variabili; vi sono ingegneri che non vogliono che trasformatori in olio, e ingegneri che non adottano che trasformatori a secco.

Gli argomenti in favore di un tipo o dell'altro in realtà avrebbero bisogno di un'esperienza maggiore di quella che ci sia consentita fino ad oggi. Infatti ci manca la possibilità di fare una statistica del comportamento dei due tipi per un periodo di esercizio sufficientemente lungo; d'altra parte questa statistica sarebbe assai difficile da farsi per la diversità dei varî sistemi di trasformatori installati e dei criterî costruttivi coi quali furono progettati e anche per le differenti condizioni di lavoro a cui i trasformatori possono venire assoggettati.

Nè d'altra parte è possibile risolvere il problema con calcolazioni o con esperienze di laboratorio, essendo difficile nelle medesime fare prove di durata nonchè riprodurre le condizioni pratiche di lavoro. Io quindi mi limito ad illustrare il tema, prospettarne i diversi punti di vista, accennare ad esperienze mie e di altri al riguardo, lieto se da una discussione di competenti sarà possibile trarre delle conclusioni definitive.

Si tratta di stabilire quali sono i vantaggi e i difetti presentati dai diversi tipi di trasformatori in relazione alle esigenze e alla economia dell'esercizio, a parità di prezzi e di garanzie offerte dalle Case costruttrici.

Per fissare le idee ricorderò rapidamente il problema costruttivo:

***

Il raffreddamento di un trasformatore avviene per *irradiazione* e per *conduzione* fra la sua superficie e il mezzo ambiente, sia aria, sia olio.

La *radiazione* dipende dalla natura della superficie (fra rame lucido e superficie verniciata a olio, il coefficiente di radiazione nell'aria varia da 1 a 23); dal valore assoluto della temperatura ambiente (fra 0° e 100° varia nel rapporto da 1 a 4,6); dalla reciproca influenza di incavi e sporgenze della superficie; dalla qualità del mezzo ambiente. Dipende poi dalla differenza di temperatura in modo non perfettamente lineare.

Digitized by Google

Il calore emesso per *conduzione* dipende dalla forma e dalle dimensioni del corpo, dalla natura del mezzo conducente. Dipende pure dalla differenza di temperatura, in modo non perfettamente lineare.

Una formola esatta sarebbe assai complicata e poco maneggevole; ci si può accontentare di una formola più semplice, se riteniamo che il calore trasmesso all'ambiente sia proporzionale alla differenza di temperatura, ipotesi accettabile dato che le differenze di temperatura che ci interessano si scostano poco dai 50°.

Possiamo quindi scrivere: $\Delta T = \frac{1}{K \cdot a}$,

dove a è la superficie specifica di raffreddamento, cioè cmq. per watt di perdita, e K un coefficiente, e precisamente i watt irradiati per cmq. di superficie e per $\Delta T = 1°$.

Il coefficiente K è variabile coi diversi tipi di trasformatori, coi diversi sistemi di raffreddamento; nonchè colle diverse temperature assolute.

Si tratta di esaminare che valori possono assumere K e a nei diversi tipi di trasformatori.

Nella pratica, analizzando le diverse costruzioni delle varie Case si ottengono dei risultati assai differenti.

Al riguardo credo opportuno di far constatare il fatto che la costruzione del trasformatore non fu studiata dalle Case costruttrici, naturalmente in generale, con quella profondità e con quel metodo con cui furono studiate le altre costruzioni elettriche.

Infatti, mentre pei motori, alternatori e dinamo si sono ormai uniformati i tipi, per i trasformatori si hanno ancora costruzioni essenzialmente diverse tanto nella forma del nucleo quanto nella forma delle bobine.

La costruzione dei trasformatori non si è ancora standardizzata.

In realtà le Case costruttrici, in generale, una volta ottenuto un tipo che diede buoni risultati non si curarono di osservare se vi sono tipi teoricamente migliori, specialmente per quanto riguarda i valori di K ed a, ma dedicarono i loro sforzi al tipo adottato, cercando di abbassarne il costo con miglioramenti di dettaglio, e cioè riducendo il posto per l'isolante, costruendo bobine che sono acrobatismi di precisione, aumentando sempre più la differenza di tensione fra spira e spira, ecc.; nei trasfor-

Digitized by Google

matori in olio poi aumentando esageratamente la temperatura del trasformatore in confronto dell'olio ambiente e ciò perchè le garanzie richieste generalmente vertono sulla temperatura dell'olio e non su quelle del trasformatore.

È invece evidente che, per ottenere razionalmente macchine che non si riscaldino, e che riescano economiche, non vi è altro sistema che quello di trovare nella forma adottata il modo di rendere massimo il valore di K e della superficie specifica di raffreddamento a parità di potenza del trasformatore.

Nella pratica questo stato di cose ha una grande influenza sui giudizi che gli ingegneri delle Società distributrici di energia danno sui diversi tipi di trasformatori, attribuendo in generale al tipo a secco o in olio difetti inerenti invece a dettagli costruttivi.

È necessario di prescindere da tali difetti e considerare una costruzione fatta secondo teoria per potere trarre le logiche conseguenze.

Il Kapp darebbe per il coefficiente K o meglio per la sua reciproca, per un trasformatore di forma non ben precisata i seguenti valori:

2250 — 2000 — 1500 per trasformatore posto in aria stagnante, essendo l'aumento di temperatura del medesimo riferito all'aria ambiente ed essendo la differenza di temperatura rispettivamente di 38° = 52° = 75° = cnt. e 1700 = 1350 = 960 = essendo la differenza di temperatura di 30° = 45° = 60° cnt., per lo stesso trasformatore immerso nell'olio, riferito l'aumento di temperatura all'aria ambiente.

L'Arnold darebbe 1600 a 2000 per ventilazione naturale, 1300 a 1700 per trasmissione fra l'olio e l'aria, 800 a 1200 per trasformatore in olio, sempre riferito l'aumento di temperatura alla temperatura ambiente.

Non credo che sia il caso di riportare i dati di trasformatori di diverse costruzioni, in ogni modo si possono trovare abbondantemente nel testo dell'Arnold. I valori di K vi sono diversissimi.

In seguito ritorneremo sul valore di K parlando delle esperienze al riguardo da noi eseguite, frattanto supponiamo per un momento che K sia costante per un dato tipo di trasformatore e nei limiti di riscaldamento normale, ed esaminiamo come si comportano i dati costruttivi di un trasformatore variandone le dimensioni lineari.

Digitized by Google

Un costruttore abbia costruito un trasformatore di un dato tipo e potenza, il quale gli dà buoni risultati sia per il riscaldamento, sia per il rendimento, la caduta di tensione e il costo. Dal trasformatore campione vuol ricavare altri trasformatori di diversa potenza, variando le dimensioni lineari.

Se aumenta le dimensioni lineari nel rapporto di M e fa lavorare con uguale sollecitazione il ferro e il rame, avremo che il peso cresce col cubo di M, ma la potenza colla quarta potenza di M; infatti, essendo aumentate del quadrato di M le sezioni, il flusso sarà aumentato del quadrato di M, le spire occorrenti a parità di tensione saranno diminuite di M^2; lo spazio quindi riservato alla sezione di una spira sarà aumentato di M^4, e cioè gli ampères e la potenza saranno aumentati di M^4. Le perdite totali aumentano col peso di M^3 (rimanendo uguali le perdite per Kg.); il rendimento quindi migliora, perchè la percentuale di perdita per KVA resi, diminuisce di M.

La caduta di tensione rimane pure invariata. Il peso specifico della macchina per KVA reso, sarebbe diminuito di M.

Per il riscaldamento, siccome l'aumento di temperatura è funzione lineare inversa della superficie di raffreddamento che diminuisce di M, se rimane costante K la differenza di temperatura, crescerà di M.

Se si vuole un uguale aumento di temperatura, bisogna fare K del trasformatore più grosso, M volte più grande del K del trasformatore più piccolo. Se si vuole tenere K uguale nei due trasformatori, allora per avere uguale riscaldamento bisogna rinunciare a portare le perdite a M^3 ma limitarsi a portarle a M^2; in tal caso sono uguali le superfici specifiche di raffreddamento ed essendo uguale K è uguale il riscaldamento. In tal caso, ammettendo di ridurre ugualmente le perdite nel ferro e nel rame, il peso cresce di M^3, la potenza di M^3; il peso specifico per KVA è quindi uguale nei due trasformatori. La percentuale di perdita per KVA è pure minore di M, come nel caso precedente.

In pratica le cose non sono così semplici. Intanto si diminuiscono le perdite del ferro usando lamiere legate, senza bisogno di ridurre l'induzione. E con ciò si ha un sensibile vantaggio.

Il coefficiente K poi non è affatto costante anche per un dato tipo di trasformatore, ma varia colle dimensioni.

Oltre poi al coefficiente K si può lavorare sulla superficie di raffreddamento; quindi quando i trasformatori raggiungono una

Digitized by Google

certa potenza si fanno canali nel nucleo, canali fra il rame e il ferro; si aumentano le superfici delle testate del trasformatore, che offrono un'ottima superficie raffreddante, ecc.

Riguardo al coefficente K esso può essere fortemente aumentato sia sottoponendo il trasformatore ad una ventilazione forzata, sia immergendolo in un bagno d'olio.

Della ventilazione forzata non ci occupiamo.

Riguardo al raffreddamento in olio, il problema tecnico è semplice.

Il trasformatore si trova immerso in un bagno d'olio al quale trasmette il proprio calore; la massa dell'olio a sua volta si raffredda verso l'ambiente attraverso le pareti della cassa in cui è racchiusa. L'olio ha una conduttività molto maggiore dell'aria; dalle esperienze da noi eseguite si può calcolare che il coefficiente di emissione di una bobina di rame immersa in un bagno di olio è circa quattro volte maggiore di quello della stessa bobina nell'aria.

Nella pratica questo dato teorico varia fortemente per la diversa fluidità dell'olio e la facilità maggiore o minore d'un rapido ricambio dell'olio caldo intorno alla superficie del trasformatore.

In realtà superfici raffreddanti interne che avrebbero poco valore nel caso di raffreddamento naturale in aria, in causa della forte irradiazione reciproca, divengono assai efficaci nei trasformatori in olio, perchè questo si scalda rapidamente per conduzione e passa via portando fuori il calore ricevuto. Altro fatto che in pratica fa trovare un coefficiente ancora maggiore per la trasmissione di calore all'olio è che il trasformatore, disposto sul fondo della cassa si trova immerso in olio sensibilmente più freddo non solo degli strati superficiali, ma anche della temperatura media della massa d'olio.

Queste variazioni di temperatura alle diverse altezze dell'olio sono variabili colla velocità di spostamento dell'olio, e cioè colla sua fluidità e la forma della macchina.

E qui apro una parentesi per riassumere alcune esperienze da noi eseguite per la determinazione del coefficiente K ed altri dati interessanti il problema.

Digitized by Google

***

Per avere un'idea del valore del coefficiente K nel caso di trasmissione di una bobina composta da rame coperto di cotone, il tutto fasciato con nastro di cotone, come normalmente si usa, sia per trasmissione nell'aria, sia per trasmissione nell'olio, indipendentemente da altre sorgenti di calore — ferro del nucleo — e da influenze derivanti da parti vicine dello stesso trasformatore, abbiamo fatto le seguenti esperienze:

Abbiamo infilato nove bobine di identica forma esterna su un nucleo di legno; ciascuna bobina era costituita da un filo di differente sezione e precisamente abbiamo cominciato col filo di $^{11}/_{10}$ e siamo arrivati al filo di $^{25}/_{10}$ per l'ultima bobina. Abbiamo calcolato come superficie raffreddante la superficie completa di ogni bobina, meno la parte affacciata al legno.

Abbiamo messo tutte le bobine in serie ed abbiamo fatto le prove con due gruppi identici, uno in aria alla temperatura ambiente, uno in olio, mantenuto ad una temperatura assoluta, costante, di circa 70° cnt., per mettere le bobine nelle condizioni reali di temperatura ambiente in cui funzionano nei trasformatori.

Abbiamo caricato i due gruppi a 4 amp., 8 amp., 10 amp., 15 amp., 18 amp., misurando coll'aumento delle resistenze le temperature di ogni singola bobina.

Abbiamo così ricavato dai diagrammi di riscaldamento delle singole bobine per ciascuna intensità di corrente ed abbiamo continuato le operazioni fino a che i diagrammi non dimostrarono che le singole bobine erano in regime.

Abbiamo quindi ottenuto un complesso di curve molto interessanti, le quali ci indicano con esattezza i coefficienti di trasmissione delle bobine verso l'olio e delle bobine verso l'aria; ci indicano pure le temperature massime raggiunte dalle bobine con data densità di corrente e data superficie specifica di raffreddamento e le densità di corrente alle quali le bobine non hanno resistito e sono saltate, e ciò sempre tanto nell'aria come nell'olio.

I risultati ottenuti colle singole temperature di regime abbiamo raccolti in due diagrammi riassuntivi, che pubblichiamo.

Digitized by Google

Nel diagramma N. 1 abbiamo segnato le differenze di temperatura raggiunte dalle bobine, in funzione della superficie specifica di raffreddamento di ciascuna bobina, e ciò tanto nell'aria come nell'olio.

Le differenze di temperatura sono fra la temperatura media del rame della bobina (misurata col metodo elettrico) e il mezzo ambiente (aria od olio). Sullo stesso diagramma abbiamo segnato, sempre in funzione delle superficie specifiche di raffreddamento, i valori dei coefficienti $\frac{1}{K}$ calcolati per ogni bobina. Come si vede, il coefficiente aumenta, aumentando la temperatura e

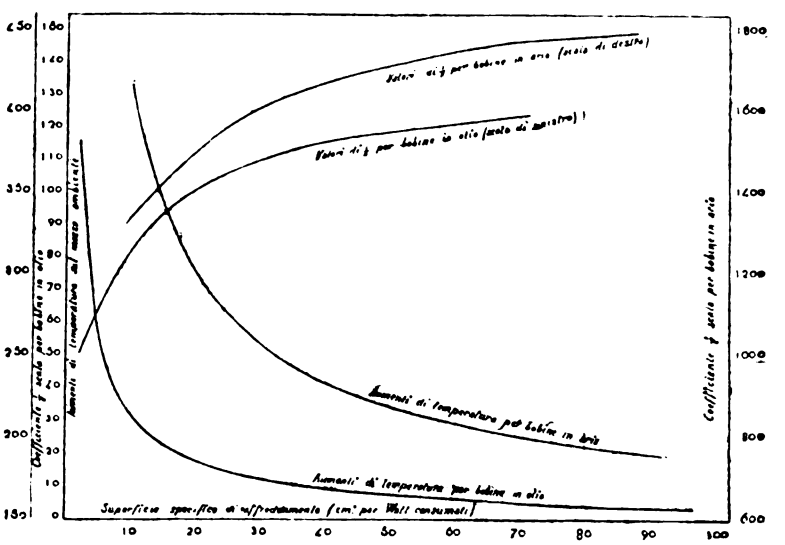


Fig. 1.

cioè diminuendo la superficie specifica di raffreddamento e precisamente per bobine nell'olio, il valore della reciproca di K varia fra 250 per differenze di temperatura superiori ai 115° cnt, fino a circa 400 per differenze di temperatura minime, intorno ai 5° cnt., e per l'aria da 1300 a 1800 per differenze di temperatura varianti da 130° a 20° cnt., da cui abbiamo dedotto che il coefficiente K nell'olio è circa quattro volte superiore che nell'aria.

Per comodità di disegno abbiamo segnato le ordinate per la

Digitized by Google

curva del coefficiente $\frac{1}{K}$ nell'olio in una scala quadrupla di quella per la stessa curva riferita a bobine nell'aria.

Riguardo al comportarsi delle bobine sottoposte a forti intensità di corrente abbiamo fatto nell'aria le seguenti osservazioni:

1. Ci siamo portati in regime con bobina a 3,2 ampères di densità di corrente, arrivando a 130° circa di riscaldamento sulla temperatura ambiente. Superficie specifica 10 cmq.

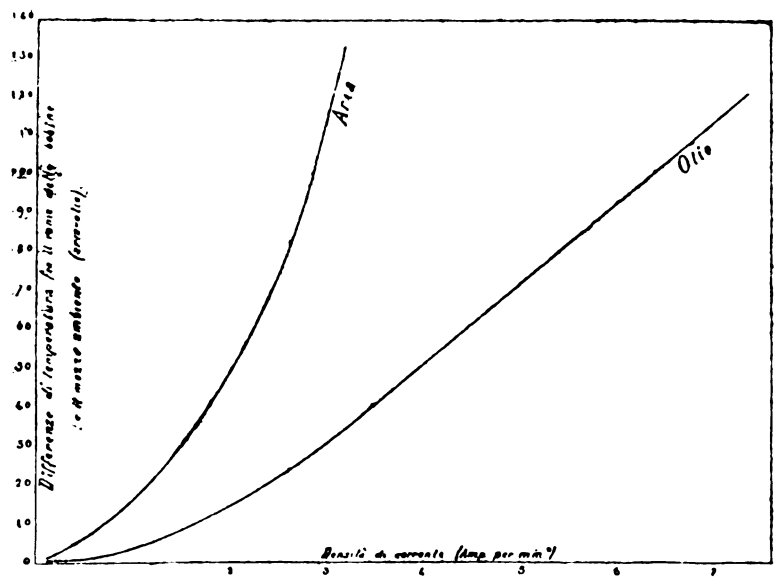


Fig. 2.

2. Con densità 3,5 amp. superficie specifica 5,5 cmq. in tre ore si arrivò a 200° assoluti con curva abbastanza pianeggiante e non dando indizi di fumo; però continuando le prove la bobina sarebbe saltata.

3. Con densità di 4,25 amp. superficie specifica di 5 cmq., la bobina cominciò a fumare a 200° assoluti dopo circa due ore.

4. Con densità di 7 amp. cominciò a fumare subito saltando in $^1/_4$ d'ora.

Nelle bobine in olio abbiamo avuto primi indizi di fumo in

Digitized by Google

una bobina con una densità di amp. 8,9 superficie specifica di 0,82 cmq. raggiungendo la temperatura di 220° assoluti.

Abbiamo proseguito la prova ugualmente portando la densità fino a 11 amp., il che corrisponde a una superficie specifica di 0,45; a circa 350° assoluti, cominciò a bollire l'olio intorno alla matassa.

Con densità 7 amp. superficie specifica 2,03 cmq., abbiamo ottenuto una temperatura assoluta di 183° senza nessun indizio, dopo tre ore di funzionamento, che la bobina si sia rovinata.

Dal complesso delle prove eseguite risulta che non solo le bobine immerse nell'olio si scaldano circa la quarta parte delle bobine nell'aria a parità di superficie specifica, ma che ad eguale temperatura assoluta in un caso si manifesta deperimento degli isolanti di cotone e nell'altro invece il deperimento non si manifesta.

Lo scopo di queste prove è stato quello di avere i dati del coefficiente teorico di trasmissione fra rame coperto ed olio, messa la bobina isolata e quindi non influenzata dalla coesistenza del complesso del trasformatore. Per le ragioni suesposte in un trasformatore questo coefficiente riesce sensibilmente diverso.

Esistono pure fortissime differenze fra tipo e tipo di trasformatore. Ricordo solo i dati di una prova eseguita su un trasformatore in olio di costruzione della mia Ditta. Tale trasformatore è della potenza di 30 KVA, rapporto di trasformazione $^{14500}{}_{225}$ volt, tipo a nuclei; superficie raffreddante del trasformatore 18.400 cmq., superficie raffreddante della cassa in lamiera liscia e calcolando alla metà il coperchio ed il fondo 22.663 cmq. Perdite totali 1085 watt.

Il coefficiente 1 K fra rame ed olio è riuscito di 272; lo stesso fra olio ed aria di 1060; lo stesso fra rame ed aria 1100. Fatto funzionare il trasformatore all'aria libera con carico ridotto, abbiamo ottenuto il coefficiente di 1650 fra il rame e l'aria.

Dalle prove precedentemente ricordate il coefficiente avrebbe dovuto essere quattro volte 272 e cioè 1085, invece è riuscito maggiore per l'influenza delle superfici interne appositamente studiate per il raffreddamento d'olio.

Ho voluto ricordare specialmente questa esperienza, perchè nella medesima abbiamo fatto misure interessanti di aumenti di temperatura interna.

Per l'olio abbiamo misurato l'aumento di temperatura ai di-

Digitized by Google

versi livelli, ottenendo un massimo di 57 gradi negli strati superiori, con un minimo di 30 gradi sul fondo della cassa. La sopra temperatura media dell'olio fu di 51 gradi, e la sopra temperatura media dell'olio circondante il trasformatore fu di 49 gradi. La temperatura delle bobine primarie, media di ciascuna bobina, fu progressivamente di 60 gradi per la più bassa e di 72° per la più alta, mentre la temperatura media di tutto l'avvolgimento primario fu di 65 gradi. Abbiamo cioè uno scarto di temperatura del 10 % circa tra la temperatura media e quella della bobina più calda.

Abbiamo pure verificato la differenza di temperatura fra mezza bobina affacciata al ferro e mezza bobina verso l'esterno, ottenendo rispettivamente le temperature di 67° e 90°, il che indica una differenza di 25° gradi fra la temperatura media del rame ed il punto più caldo dell'avvolgimento.

La misura ripetuta nell'aria ambiente ci diede una differenza della temperatura della bobina più calda rispetto alla temperatura media del 30 %.

***

Ritornando alla questione generale, è evidente che il problema costruttivamente deve essere studiato nei suoi due punti distinti: raffreddamento del trasformatore rispetto all'olio ambiente, raffreddamento dell'olio a mezzo della superficie della cassa. È evidente che il trasformatore per trasmettere calore all'olio, deve essere più caldo dell'olio stesso; ed è del massimo interesse di conoscere la temperatura del trasformatore, non quella dell'olio ambiente. Invece è assai raro che nelle prove di un trasformatore in olio si verifichi a che temperatura arrivino gli avvolgimenti, ma si limita il collaudo alla misura della temperatura superficiale dell'olio.

Si hanno così dei trasformatori il cui olio non si riscalda eccessivamente, che lavorano invece in condizioni disastrose e malgrado le mirabili qualità dell'olio, come conservatore e antiossidante, hanno una vita brevissima, e risentono gravemente di ogni sovraccarico anche momentaneo.

Tenuto calcolo che un avvolgimento nell'olio si trova in condizioni migliori che nell'aria, si può adottare come riscaldamento del rame di un trasformatore in olio 60°. Essendo di 60° la dif-

Digitized by Google

ferenza di temperatura dell'olio superficiale, ammessa di 45° la differenza di temperatura media dell'olio che circonda il trasformatore, possiamo ammettere che la differenza media di temperatura fra il trasformatore e il suo ambiente sia di 15°, il che è come ammettere che il coefficiente di raffreddamento del trasformatore nell'olio riferito alla temperatura ambiente è $^6/_5$ il coefficiente dello stesso trasformatore se fosse nell'aria (ammesso in questo un riscaldamento di 50°).

Da ciò si deduce che un dato trasformatore se nell'aria abbisogna di una superficie specifica a, nell'olio gli è sufficiente la superficie specifica $\frac{5}{6}\,a$; cioè può avere $\frac{6}{5}$ di perdita; pari ad una potenza di circa il 20 % maggiore. Questa potenza può essere sensibilmente aumentata migliorando la forma dell'apparecchio onde offra all'olio la massima superficie efficace; nonchè tenendo alto il livello dell'olio sul trasformatore in modo che la temperatura media dell'olio ambiente sia minore.

Riguardo alla superficie raffreddante della cassa, questo è un problema affatto diverso. In generale per avere alla superficie dell'olio 60° si adotta una superficie specifica media di 25 cmq. per watts di perdita, il che, se la temperatura media dell'olio fosse tutta di 50°, corrisponderebbe a un coefficente di $\frac{1}{K} = 1250$.

Da quanto detto risulta evidente che il vantaggio economico, cioè il costo della macchina, ove non si voglia avere una macchina troppo sovraccaricata, è più limitato di quanto comunemente si creda. Se si tiene calcolo del costo dell'olio e del cassone, costo assai maggiore per K.V.A. nei piccoli trasformatori che nei grossi, si vede che per le piccole potenze, ove non convenga per l'isolamento, il trasformatore in olio riesce più costoso del trasformatore a secco.

Per potenze superiori a 50-70 KVA il tipo in olio presenta qualche convenienza, convenienza che va crescendo a mano a mano che cresce la potenza dell'apparecchio.

Ad ogni modo è necessario il verificare se certe esagerate convenienze non sono ottenute a scapito della macchina sepolta nell'olio; è necessario collaudando un trasformatore di tener calcolo delle reali condizioni di riscaldamento dell'avvolgimento. A me basta il far constatare che se si vuol costruire in condizioni prudenti, il vantaggio del raffreddamento in olio è più limitato di quanto generalmente si creda.

Digitized by Google

***

Ma vi sono considerazioni interessanti l'esercizio, e che sono certo più importanti della piccola differenza di prezzo d'acquisto.

La prima qualità richiesta in trasformatori sparsi nelle cabine di una vasta rete è la robustezza che garantisce la sicurezza di esercizio, e cioè la maggior resistenza della macchina a sovraccarichi e sovratensioni.

Il trasformatore in olio teoricamente risponde meglio a questi due requisiti.

Sia per la maggior massa, che richiede maggior tempo a mettersi in regime, sia per le mirabili qualità dell'olio come rapido raffreddante (quattro volte più dell'aria) il trasformatore in olio è il più adatto a sostenere sovraccarichi, specialmente momentanei.

Infatti se il vantaggio del raffreddamento in olio è limitato per la piccola differenza di temperatura fra trasformatore ed olio disponibile in confronto della grande differenza di temperatura fra trasformatore ed aria, è invece completo pei sovraccarichi, poichè le differenze di temperatura che interessano il fenomeno hanno in questo caso uguale valore.

Oltre al fatto che l'isolante può sopportare temperature assolute maggiori in olio che in aria.

Anche per quanto riguarda le sovratensioni è preferibile il trasformatore in olio. L'olio, oltre ad essere un perfetto isolante, colla sua penetrabilità rende più uniforme l'isolamento e nell'eventualità di un principio di guasto, essendo mobile, ripara automaticamente l'isolamento, ricambiandolo. In un trasformatore a secco, sia per un difetto locale di costruzione, sia per qualche colpo ricevuto o per qualche crepa formatasi col tempo negli isolanti induriti, crepe non infrequenti specialmente pei trasporti, è facile si trovino dei punti deboli, che saltano alla prima sopratensione. Un punto debole è poi sottoposto a un progressivo deperimento. Nel caso poi di una scarica, l'olio agisce da spegnitore; ad ogni modo è difficile che si abbruci tutto il trasformatore; nei tipi a secco invece molto di frequente il rovinarsi di una bobina provoca l'abbruciamento di tutta una colonna.

Bisogna però ricordare che l'olio, se ha ottime qualità, è però enormemente delicato. La più piccola traccia di umidità ne ri-

Digitized by Google

duce fortemente il potere isolante; basta il 5 % per diecimila di umidità per ridurre la resistibilità quasi del 50 % (da 35.000 volts a 21.000 volts).

L'olio per trasformatori è assai igroscopico e per quanto la cassa sia ermeticamente chiusa è inevitabile l'entrata e l'uscita dell'aria, che a contatto colla superficie dell'olio può cedere la sua umidità. Infatti è facile constatare in molti trasformatori in olio che abbiano funzionato per qualche tempo, che la parte inferiore del coperchio è fortemente arrugginita e in molti casi presenta protuberanze di ruggine le quali testificano uno sgocciolamento. L'olio che fu a suo tempo immerso nel trasformatore era perfettamente secco e questa umidità che si è condensata sul coperchio durante il riscaldamento dell'olio, non può essere che umidità atmosferica assorbita dall'olio stesso durante le variazioni di funzionamento a carico e a vuoto, ed evaporate durante il riscaldamento.

Questa umidità oltre a diminuire il potere isolante dell'olio, agisce in un modo singolarmente dannoso, perchè, per un fenomeno molecolare, tende a sostituirsi all'olio che impregna gli isolanti di cotone e cioè va al punto più delicato della macchina provocandone l'abbruciatura. Sono frequentissime tali abbruciature di trasformatori in olio, le quali si manifestano sulla superficie esterna di una data bobina e se il trasformatore fu levato di servizio in tempo non si sono propagate nell'interno della bobina stessa.

L'aggravante è che l'olio umido si porta sensibilmente al fondo della cassa per il suo peso specifico, tanto che in molti esercizi ove si usa ricambiare l'olio dei trasformatori, si lascia defluire una certa quantità di olio al fondo lasciando l'olio sovrastante ed aggiungendo solo in parte olio secco. Il portarsi dell'umidità sul fondo è assai dannoso, perchè è la parte dell'olio più fredda e quindi meno facile ad espellere l'umidità; inoltre il trasformatore giace appunto sul fondo e quindi necessariamente negli strati più umidi.

Il vantaggio quindi della maggior resistenza del trasformatore in olio a sovraccarichi e a sovratensioni è assai diminuito dalla delicatezza dell'olio e dalla facilità che questo non si trovi nelle condizioni in cui dovrebbe essere.

Per le ragioni sopradette un trasformatore in olio richiede una sorveglianza assai più oculata di un trasformatore a secco e le principali società hanno organizzato una revisione periodica

Digitized by Google

dell'olio per tutti i loro trasformatori, operazione questa abbastanza complicata e che in ogni modo è sempre causa di un sensibile dispendio, perchè bisogna tener calcolo che le grandi Società per distribuzione di energia elettrica hanno centinaia di cabine sparse su superfici il cui diametro supera in media i 50 Km. Ad aggravare il pericolo sta il fatto che vi sono ancora molti elettricisti che hanno invece il concetto che un trasformatore in olio non richieda sorveglianza.

Altra ragione che richiede una sorveglianza speciale nei trasformatori in olio è il ben noto fenomeno del condensarsi dell'olio.

A me non consta che siano stati fatti studi esatti sulle ragioni che provocano questo fenomeno, ma molto facilmente esso si verifica per una dissociazione dell'olio provocata dalla temperatura troppo elevata del trasformatore immerso, temperatura che può essere dovuta a vizi costruttivi oppure a sovraccarichi accidentali.

Il fatto però è che molte volte anche dopo un breve periodo di esercizio si formano sul fondo della cassa, sulle pareti del trasformatore e anche sulle pareti della cassa, dei depositi più o meno densi, i quali vanno da una poltiglia a dei veri strati compatti come di asfalto che si devono levare collo scalpello.

La resistibilità di questa poltiglia è sensibilmente uguale alla resistibilità dell'olio, almeno per le qualità di poltiglie che ebbi occasione di esaminare; ma il fatto grave è che il formarsi di questa poltiglia ostacola la velocità di movimento dell'olio e diminuisce la trasmissione di calore tanto del trasformatore verso l'olio che dell'olio attraverso le pareti della cassa.

Naturalmente per queste ragioni il fenomeno anzichè diminuire aumenta rapidamente.

Conosco esempi tipici di simile fatto.

In un caso un trasformatore dopo cinque anni di esercizio fu trovato a 200° di temperatura, mentre dall'esterno non presentava indizio di speciale riscaldamento. È bensì vero che il potere isolante delle bobine impregnate di olio e di melma era rimasto ugualmente alto; ma il cotone si era deteriorato e certo la macchina doveva considerarsi come completamente rovinata.

In altro caso il fenomeno avvenne con una maggiore rapidità e in proporzioni anche più gravi. Dopo un paio di anni di esercizio quasi tutto l'olio si condensò sulle pareti del trasformatore, come si vede dalle fotografie riprodotte (fig. 3, 4, 5).

Digitized by Google

In generale però il fenomeno avviene molto lentamente; è quasi insensibile per i primi quattro anni e aumenta rapidamente in seguito.

Qualche grossa società di distribuzione pratica senz'altro un periodico totale ricambio di olio ai suoi trasformatori ogni cinque-sei anni. Questo servizio richiesto dall'olio è certamente molto gravoso, sia per la sorveglianza, sia per il costo materiale che il ricambio dell'olio dei trasformatori viene a causare.

Infatti per trasformatori da 50 KW si può calcolare che la spesa per un simile servizio corrisponde al 5 % all'anno del costo del trasformatore.

Per quanto riguarda il costo di esercizio e la sorveglianza, i trasformatori del tipo ventilato sono da escludersi *a priori.*

Non è infatti concepibile il funzionamento di cabine abbandonate con organi in moto come sono i ventilatori. La sicurezza di esercizio avrebbe in questo caso un coefficiente molto ma molto basso, perchè esposta a tutti i pericoli pel funzionamento del ventilatore; la spesa di esercizio e di sorveglianza sarebbe pure gravissima.

Il problema dei trasformatori ventilati invece è interessante sotto un altro aspetto.

In una cabina appena costruita non conviene installare trasformatori di potenze superiori assai a quelle che si prevede saranno occorrenti entro un breve periodo di tempo e ciò sia per il capitale immobilizzato, sia per le inutili perdite che si verrebbero ad avere. D'altra parte non è neppur conveniente di ricambiare molto di frequente i trasformatori di una cabina, specialmente quando se ne hanno delle centinaia. Perciò è molto comodo, avendo trasformatori a secco, oppure in occasione di richieste straordinarie, magari per breve periodo (all'epoca della trebbiatura, ecc.), di applicare loro una ventilazione artificiale.

La potenza dei trasformatori in tal modo aumenta circa del 30 % e quindi in generale si evita un ricambio di trasformatori.

Questo vantaggio, che in pratica è molto importante, non si può raggiungere in modo efficace che con trasformatori a secco.

Dove però il trasformatore a secco è assolutamente superiore e generalmente preferito al trasformatore in olio è per *la facilità di riparazione e di verifica.*

Un trasformatore nell'aria è riparabile in generale al massimo in dodici ore, quando si abbiano bobine di ricambio e la riparazione è fatta con grande facilità sul posto.

Digitized by Google

Il trasformatore in olio invece richiede dodici ore solamente per essere levato ed asciugato. A queste aggiunte le dodici ore per la riparazione e almeno sei ore per il ricambio dell'olio si ha una sospensione di trenta ore che in molti casi è assai dannosa.

Nel caso poi di riparazione in campagna è più facile la riparazione sul trasformatore a secco, anche perchè si può giudicare ad occhio con maggiore facilità quali sono i guasti e quali i risultati della riparazione; il trasformatore ad olio riparato deve essere immerso nella cassa, ed essendo l'operazione in generale affidata ad operai non singolarmente specialisti e privi di mezzi opportuni di verifica, riesce molte volte imperfetta, quindi si deve tornare da capo.

Nel caso di una riparazione poi le spese sono sensibilmente maggiori; l'olio del trasformatore guasto è difficilmente ricuperabile e quindi si deve aggiungere tutta la spesa del nuovo olio.

L'altro dettaglio pratico di cui conviene tenere conto è il seguente:

È difficile che una grande società abbia trasformatori tutti della stessa Casa; e siccome in generale le Case impongono il loro olio, quindi le Società distributrici di energia elettrica sono obbligate a tenere magazzini di olio sproporzionati e tanti quantitativi sufficienti ciascuno per ogni marca di trasformatore che hanno installato.

Riguardo alla *facilità di trasporto*, dato importante per le grandi reti, io credo preferibile il tipo a secco.

Vi sono però ragioni pro e contro:

Il tipo in olio è più pesante, però se è munito di piccole ruote sul fondo può riuscire facilmente scaricabile; ha però il grave difetto che i cassoni oggi costruiti, specialmente quelli in lamiera ondulata, non offrono una tenuta sufficientemente garantita.

In quasi tutti i tipi, le scosse di un trasporto su strade mal tenute o su cattivi acciottolati, provocano inevitabilmente piccole perdite le quali sono assolutamente non riparabili, sia nei trasformatori in cui il fondo è attaccato alle lamiere laterali con massa di piombo e stagno e mastice, sia per quelli saldati autogenicamente di costruzioni oggi correnti.

L'avere un trasformatore in piena campagna con una perdita per quanto piccola è un fatto gravissimo, neppure ammissibile.

Per queste ragioni noi, per le casse liscie, costruiamo casse a bandone stagnato sottilissimo come per le latte da petrolio, sostenute da gabbie in ferro ad U. Le casse sono facilmente sal-

Digitized by Google

dabili, quindi in generale non perdono, ma anche se perdono possono essere riparate sul posto.

Per le casse in lamiera ondulata abbiamo recentemente preso un brevetto speciale per la saldatura autogena, e benchè ci manchino i dati di esperienza, confidiamo che il sistema razionale col quale si può fare la saldatura possa garantire la singolare robustezza della medesima.

Per il trasporto dei trasformatori in aria vi è da considerare che benchè siano più leggeri e benchè l'incastellatura fatta con due ruote ne renda facilissimo lo scarico, pure la macchina e le sue parti più delicate sono troppo esposte alle manomissioni dei carrettieri e degli operai. Un trasformatore il quale abbia parecchi anni di vita ha inevitabilmente gli isolanti induriti, a differenza dei trasformatori in olio, quindi è molto più sensibile alle scosse e agli eventuali urti ed è assai facile il formarsi di crepe nelle superfici isolanti, che creano punti deboli nel trasformatore e quindi lo rendono più soggetto ai guasti durante l'esercizio.

Ci rimane da considerare il problema *della durata delle macchine*; ma per questo ci mancano dati di fatto e statistiche dalle quali avere concetti esatti, essendo i trasformatori di costruzione troppo recente e ancora in periodo di perfezionamento.

In pratica poi il problema non è facilmente risolvibile con una formola generale, perchè dipende essenzialmente dai criteri costruttivi diversi seguiti dalle diverse case.

Infatti sulla durata di un trasformatore ha un'influenza enorme la temperatura massima che raggiunge una singola parte di un avvolgimento.

Ora il rapporto fra la temperatura massima di una parte dell'avvolgimento e la temperatura media di tutto l'avvolgimento è assai variabile nelle diverse costruzioni.

In trasformatori a mantello di costruzione tedesca noi abbiamo trovato differenze di 25° fra la temperatura del rame nella parte della bobina chiusa fra il ferro, in confronto della parte esterna ventilata della stessa bobina.

Nel trasformatore sopra ricordato mentre nell'olio avevamo variazioni del 10 % queste nell'aria si elevarono al 30 %.

È però certo che a parità di costruzione e di riscaldamento, un trasformatore in olio al quale l'olio sia mantenuto in condizioni costanti di fluidità e di resistenza, ha una durata maggiore dei suoi isolanti, specialmente del cotone delle bobine.

Digitized by Google

Infatti sotto l'olio non abbiamo fenomeni di ossidazione nè di ozonificazione dell'aria, che sono i grandi nemici degli isolamenti in cotone esposti all'aria e alle scariche elettriche silenziose.

È però vero che abbiamo in funzione quasi da venti anni trasformatori a secco i quali compiono ancora assai bene il loro ufficio; d'altra parte il mantenere costanti le condizioni dell'olio di un trasformatore è così gravoso che probabilmente in pratica questa superiorità dei trasformatori in olio in merito alla durata delle macchine è più fittizia che reale.

***

Da tutto quanto sopra ricordato, colla maggiore oggettività possibile, credo che si potrebbero trarre le seguenti conclusioni:

Riguardo al costo delle macchine, il vantaggio del trasformatore in olio su quello a secco, è minore di quanto si creda. È però troppo facile di aumentare il vantaggio a danno delle macchine, perchè oggi, almeno da noi, non si chiedono garanzie sulla temperatura effettiva del trasformatore rispetto all'olio ambiente. È necessario che i nostri Ingegneri progettisti e collaudatori si occupino di questo dato importantissimo.

A parità di buona costruzione, per la sicurezza d'esercizio, durata, ecc., è preferibile l'olio; ma è indispensabile una sorveglianza ben organizzata, altrimenti il vantaggio si trasforma in danno più grave.

Finanziariamente un esercizio con trasformatori in olio è più costoso di un esercizio con trasformatori a secco.

Altri dettagli pratici rendono preferibile il trasformatore a secco.

Probabilmente oggi è ancora immatura la soluzione del problema. Allo stato attuale della industria dei trasformatori è forse ancora preferibile nella generalità dei casi il trasformatore a secco. A prova di quanto sopra sta il fatto che, come costruttore, mi è avvenuto parecchie volte di sostituire trasformatori in olio con trasformatori a secco a ditte che da trasformatori in olio ebbero pessimi risultati. Non mi è mai capitato il caso inverso.

Finirò con un augurio e cioè che l'industria dei trasformatori si perfezioni, e divenga meno commerciale, ma più tecnica, e ciò non può ottenersi senza l'azione degli Ingegneri delle So-

Digitized by Google

cietà acquirenti, i quali devono esaminare con maggior cura le diverse costruzioni e non accontentarsi di garanzie generiche accordando la preferenza al minor prezzo; e ciò a tutto danno dei costruttori più coscienziosi.

RÉSUMÉ

La communication considère spécialement les transformateurs destinés aux réseaux des Sociétés qui distribuent l'énergie électrique: machines pour tensions primaires de 2000 à 15.000 volts et puissance allant jusqu'à 300-400 KVA.

Bien que destinés à un service de première importance, ces transformateurs doivent être construits de façon à ne réclamer qu'un minimum de surveillance, car ils sont destinés à être installés dans des cabines distantes les unes des autres et peu facilement accessibles.

Il s'agit de décider si, pour un service de cette nature, il faut préférer le transformateur à sec à celui immergé dans un bain d'huile, ou vice versa; en d'autres termes, à parité de prix d'achat et de garanties offertes par les constructeurs, déterminer les qualités et les défauts de ces deux classes de transformateurs, eu égard aux exigences du service auquel on veut les consacrer et à l'économie d'une exploitation de la nature de celle qu'on vient de décrire.

Le Rapporteur résume d'abord la théorie du refroidissement des transformateurs, qu'il exprime par la formule approximative suivante:

$$\Delta T = \frac{1}{Ka},$$

où ΔT représente la différence de température entre le corps échauffé et le milieu ambiant, a, la superficie spécifique de refroidissement, ou cm^2 par Watt de perte, K, un coefficient qui varie avec les différents types de transformateurs, avec les différents systèmes de refroidissement, avec les différentes températures absolues, etc.

Digitized by Google

Après avoir montré combien il est important d'arriver, dans la construction des transformateurs, à atteindre des valeurs très élevées de K, après avoir fait connaître ces valeurs telles que les donnent les constructeurs ou qu'on les obtient de machines de différentes origines, le Rapporteur résume les résultats d'une série d'expériences instituées pour déterminer la valeur théorique de K, soit dans les enroulements à l'air libre, soit dans les enroulements immergés dans un bain d'huile.

Ces expériences montrent que la valeur de K est dans l'huile environ quatre fois celle de K à l'air libre.

Étant donné que le transformateur immergé doit céder à l'huile dans laquelle il baigne l'excès de chaleur dont on veut le libérer, résultat qui est proportionnel à la différence de température entre l'huile et le transformateur, et supposant que l'on se soit proposé de travailler avec une température moyenne du cuivre de l'appareil qui ne dépasse pas 60° au-dessus de la température extérieure; admettant, en outre, que l'huile, dans ses couches supérieures, atteigne une température de 50° au-dessus de la température extérieure, les expériences dont on vient de parler, et qui attribuent à l'huile un coefficient de dispersion de la chaleur quatre fois plus grand que celui de l'air, montrent que le transformateur immergé pourra supporter un charge de 30 % en plus de même transformateur non immergé dans l'huile. Dans la pratique, des expériences, que l'on rapporte, confirment ces résultats, et montrent qu'on peut les rendre encore plus sensibles si le transformateur est muni de surfaces intérieures spécialement aménagées pour la circulation de l'huile.

De toute façon ces données sont intéressantes, car elles indiquent que l'avantage économique de l'immersion, quand on ne veut pas trop surcharger l'appareil, est plus faible qu'on ne l'imagine communément. Si l'on tient compte du coût de l'huile et de celui du caisson — l'un et l'autre bien plus fort par KVA pour les petits transformateurs que pour les grands — on voit aussitôt que pour les petites puissances le transformateur immergé est moins avantageux que le transformateur à sec.

Dans la pratique commerciale on a parfois des idées moins précises, aussi le Rapporteur s'efforce-t-il de persuader les propriétaires d'installations de la nécessité de mesurer la température du transformateur, et non pas celle de l'huile dans laquelle il baigne, car le point important pour eux est que le cuivre de leurs appareils ne travaille qu'à une température limitée et la mesure de celle de l'huile ne les renseigne pas du tout à cet égard.

C'est précisément parce qu'on a pris l'habitude de limiter les essais de réception à la mesure de la température des couches superficielles de l'huile qu'on trouve si souvent des transformateurs qui fonctionnent dans

Digitized by Google

des conditions désastreuses, se ressentent exagérément de toute surcharge, même de peu de durée, et ont une vie très limitée, bien que, pendant le cours de leur existence, on n'ait jamais eu à constater un échauffement excessif de l'huile dans laquelle ils baignent, et en dépit des admirables qualités de ce liquide comme préservatif et antioxydant.

Le Rapporteur présente ensuite des considérations intéressantes sur l'emploi des transformateurs, et fait les observations suivantes :

Pour la résistance de l'appareil aux surcharges, *un bon transformateur immergé est sans aucun doute préférable à tout autre, soit parce qu'il offre une masse supérieure à celle d'un transformateur à sec, et demande par conséquent plus de temps pour se mettre au régime, soit par suite de l'aptitude de l'huile au refroidissement, laquelle est quatre fois plus grande que celle de l'air ; sans compter qu'immergé dans l'huile, l'isolant des enroulements peut supporter sans danger des températures plus fortes que dans l'air.*

Pour la résistance aux surtensions, *c'est encore le transformateur immergé qu'il faut préférer. Outre que l'huile est par elle même un excellent isolant, lorsqu'elle pénètre dans tous les interstices des enroulements, elle en rend plus uniforme l'isolement propre ; dans l'éventualité d'un défaut naissant, sa fluidité et sa mobilité sert à réparer automatiquement l'isolant endommagé, tandis que dans un appareil à sec tout point faible est soumis à un dépérissement progressif ; enfin, dans le cas d'une décharge brusque, l'huile fait fonction d'extincteur, et empêche que le transformateur soit entièrement grillé.*

Qualité de l'huile. — *La moindre trace d'humidité réduit énormément le pouvoir isolant de l'huile ; il suffit de 5 pour 1000 d'eau pour faire tomber sa résistivité de près de 50 %.*

Un phénomène moléculaire particulier à l'eau contenue dans une huile donnée rend celle-ci singulièrement dangereuse pour l'appareil qu'elle devrait protéger : au contact avec les enroulements, cette eau tend à se substituer à la matière grasse qui imprègne le coton de l'isolement, c'est-à-dire le point le plus délicat de l'appareil, et finalement provoque le grillage.

L'eau, encore, tend toujours à descendre dans la partie inférieure du caisson, soit, dans la région la plus froide, où il est moins probable que la chaleur de l'appareil puisse arriver à l'évaporer ; en outre, le transformateur repose nécessairement sur le fond du caisson, c'est-à-dire dans les couches où l'huile est plus sujette à contenir de l'eau.

Un autre phénomène constaté dans l'huile, qui a subi des changements répétés de température, est sa condensation progressive sur le transformateur et sur les parois du caisson. Cette sorte de boue grasse, bien

Digitized by Google

que pourvue d'une résistivité élevée, s'oppose à la rapidité des mouvements de l'huile, et par suite retarde le refroidissement du transformateur par rapport à l'huile, et celui de l'huile à travers les parois du caisson.

Pour toutes ces raisons, il est évident que le transformateur immergé réclame un entretien spécial et une surveillance continue, pour assurer à l'huile la conservation, à un haut degré, de ses propriétés isolantes et de sa fluidité.

Pour la facilité à réparer *un transformateur endommagé, l'avantage reste évidemment au transformateur à sec, tant à cause de la plus grande rapidité que de la moindre dépense de l'opération; le transformateur à sec offre en outre la possibilité de distinguer du premier coup d'œil le point à réparer et de constater de même l'effet de la réparation.*

Pour la commodité du transport, *si le transformateur à sec est plus léger que l'autre, il est, par contre, plus délicat. Toutefois le transport du transformateur immergé dans son caisson ne s'opère pas toujours sans provoquer des fuites qui, même légères, sont difficiles à réparer, et causent souvent des ennuis dans des transformateurs abandonnés dans des cabines éloignées.*

A l'égard de la durée du transformateur *il est avéré qu'à parité de construction et d'échauffement, un transformateur immergé dont l'huile sera maintenue dans de bonnes conditions de résistance et de fluidité, conservera son isolement plus longtemps qu'un transformateur à sec.*

Le Rapporteur mentionne, en outre, certaines expériences desquelles il résulterait que pour des transformateurs de forme et de dimensions égales la différence entre la température maximum qu'atteint une partie déterminée d'un enroulement par rapport à l'enroulement tout entier est beaucoup plus faible dans le transformateur immergé que dans le transformateur à sec: lorsque cette différence atteignait 30 % dans ce dernier appareil, elle tombait à 10 % lorsqu'on le faisait fonctionner dans l'huile.

Ces résultats d'expériences ont évidemment une grande importance à l'égard de la durée des appareils.

Le Rapporteur conclut en affirmant qu'à son avis le transformateur immergé sera toujours préférable au transformateur à sec quand il aura été vérifié qu'on l'a construit avec une observation rigoureuse des règles en la matière, et que, pendant le fonctionnement, on aura soin de surveiller l'huile et de ne lui rien laisser perdre de ses qualités d'isolation ni de sa fluidité.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. Leo Finzi (Aachen) *remarque que soit le " Verband Deutscher Elektrotechniker „ soit l'"American Institute of Electrical Engineers „ dans la Standardisation Rules, prescrivent que la température des enroulements soit rélevée en mesurant leur variation de résistance contrairement à ce qu'indique le rapporteur, c'est-à-dire par la mesure directe de la température de l'huile.*

Cette dernière méthode était contenue dans les prescriptions du V. D. E. antérieures à 1909.

Il ne trouve pas juste qu'on puisse dire que les constructeurs aient négligé les transformateurs vis-à-vis des machines électriques. Le fait qu'aujourd'hui des transformateurs d'une puissance supérieure à 10.000 KVA. fonctionnent sans inconvénients à des tensions supérieures à 100.000 Volts monire le contraire.

Le transformateur est la plus simple et la mieux connue parmi les machines électriques. Le refroidissement des transformateurs de puissance moyenne ne présente pas de grandes difficultés, les moyens de calcul sont maintenant bien arrêtés et se réduisent à un problème de minimum: étant-donné le rendement désiré et le prix des matériaux, établir les dimensions de manière que le coût des transformateurs soit le minimum possible.

En ce qui concerne l'huile, il ne faut pas étendre à tous les transformateurs les mauvais résultats de quelques-'uns, dûs à la qualité de l'huile employée. En Allemagne on peut dire que presque tous les transformateurs employés sont dans l'huile.

M. E. J. Brunswick (Paris) *prend part à la discussion.*

M. P. Boucherot (Paris), *Président, présente à son tour quelques considérations sur la température. Il partage entièrement l'opinion de l'Ing. Clerici que la mesure de la température de l'huile est absolument insuffisante pour apprécier celle des enroulements. Même la mesure de la variation de la résistance ne donne encore que des indications audessous de la réalité, car elle n'indique que la température moyenne. Il est fort probable que de l'extérieur à l'intérieur d'un faisceau de fils réunis en une masse serrée, la températuve se répartit suivant une loi parabolique compliquée: on peut toutefois admettre que, quelle que soit*

Digitized by Google

la forme de l'enroulement, entre la température maximum θ_{max}, *la température moyenne* θ_m *et la température superficielle* θ_s *existe la relation suivante:*

$$\theta_{max} = \theta_m + a\,(\theta_m - \theta_s),$$

le coefficient a *dépendant de la forme de la bobine: théoriquement, il est compris entre 0,33 et 1: pratiqmaeent, entre 0,4 et 0,8, suivant la forme de la bobine. Il est bon de se rappeler que* θ_{max} *est beaucoup plus grand que* θ_m, *si* θ_m *est, de son côté, beaucoup plus grand que* θ_s: *c'est pourquoi la température de l'huile est une indication très insuffisante.*

Digitized by Google

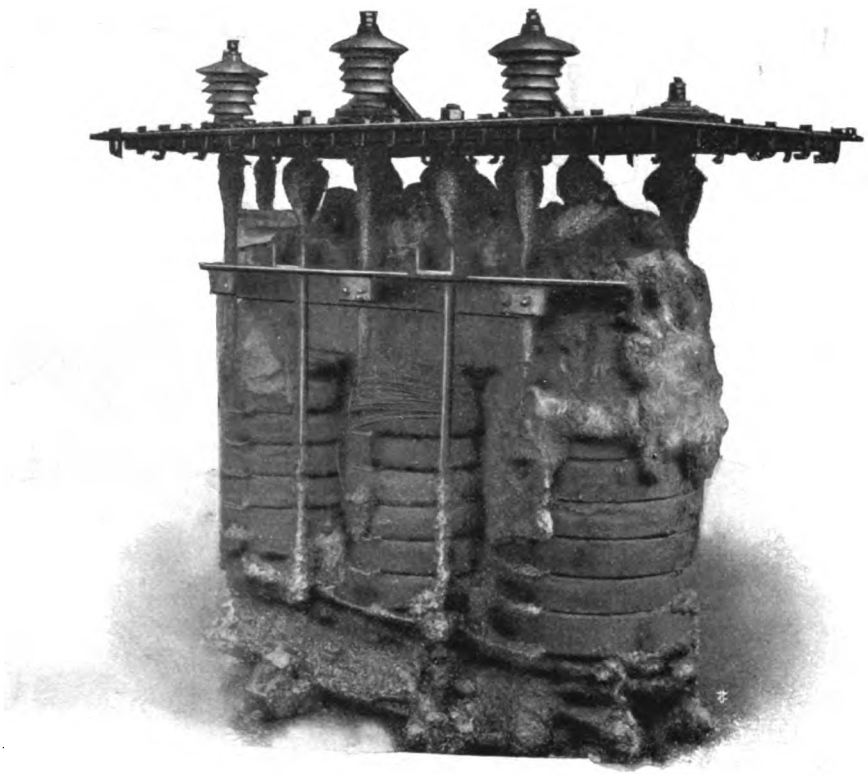


Fig. 3.

Digitized by Google

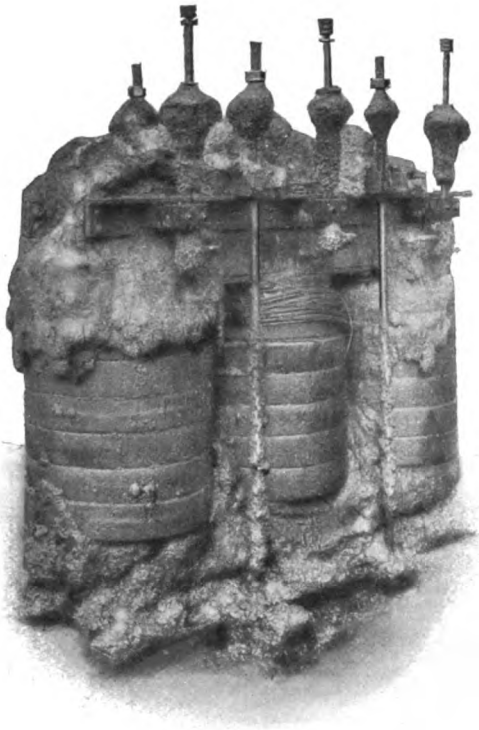


Fig. 4.

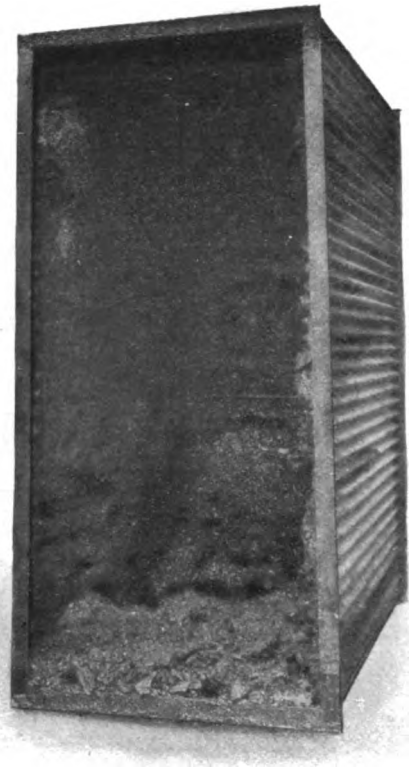


Fig. 5.

Digitized by Google

Le problème de la transformation de la fréquence

Rapporto sul tema N. 10 del Congresso.

Relatore M. PAUL BUNET (Paris).

I.

Généralités.

1. — La transformation de courants alternatifs d'une certaine fréquence en courants d'une fréquence différente est devenue une nécessité par suite de la diversité des problèmes à résoudre en électrotechnique. Dans les premiers jours de l'électricité industrielle, c'est-à-dire il y a quelque vingt ou vingt-cinq ans, on adoptait dans chaque installation une fréquence rendant facile la construction des machines et commodément applicable aux appareils récepteurs. Comme l'éclairage fut le premier but des installations électriques, on se trouva naturellement porté vers les fréquences donnant de bons résultats dans les lampes à arc et incandescence, ce qui amena les fréquences 60, 70 et 90 et même 100, 125, 133 par seconde. L'apparition des moteurs vint modérer les chiffres adoptés, car, pour les faibles puissances principalement, le grand nombre de pôles des moteurs asynchrones les rend peu avantageux et inférieurs aux moteurs recevant des fréquences plus modérées. Les problèmes de traction électrique avec emploi de moteurs à courant continu amenèrent aux commutatrices et les premiers modèles de celles-ci ne fonctionnaient convenablement qu'aux basses fréquences.

La nécessité de classer et d'unifier s'imposant comme toujours,

Digitized by Google

on arriva à s'entendre à peu près sur la fréquence 25 dans les réseaux de force motrice et ceux où les commutatrices absorbent la majeure partie de la puissance; l'éclairage à incandescence est encore possible à la rigueur surtout avec basses tensions et gros filaments; l'éclairage à arc est difficile et peu satisfaisant. Les réseaux qui ont, au contraire, l'éclairage pour but important, ont adopté en général le chiffre de 50 périodes par seconde en Europe et 60 périodes en Amérique; à ces fréquences, l'éclairage à arc est bon; les moteurs asynchrones possèdent des valeurs très satisfaisantes pour les rendements et facteurs de puissance: ils sont même, à certains points de vue, plus avantageux qu'à 25 périodes à cause du plus grand choix des vitesses possibles. Actuellement on est arrivé à construire des commutatrices fonctionnant parfaitement à 50 périodes, ce qui réduit le nombre de cas où la fréquence 25 s'impose.

A part ces deux valeurs, il reste beaucoup de réseaux qui ont dû conserver des fréquences intermédiaires ou supérieures comme 40, 42, 45, 70, choisies au début de ces installations et qu'il est souvent difficile et presque impossible de changer ultérieurement.

La traction électrique monophasée a introduit des fréquences encore plus basses que 25, comme $16\,^2/_3$, 15 et on a même parlé de 10 ou 12. Il est possible que certaines difficultés de construction apparaissant dans les génératrices, surtout si elles ont une grande vitesse et par conséquent peu de pôles, dans les transformateurs qui sont très lourds et chers, fassent revenir à la fréquence 25, si on reconnaît, comme cela est probable, la possibilité de faire de bons moteurs à collecteur à cette fréquence; mais il y aura néanmoins d'importants réseaux établis à ces basses fréquences.

Le premier problème qui se pose en ce qui touche la transformation de la fréquence est donc le raccordement entre eux de réseaux établis à 50, 40, 25, 16, etc. périodes par seconde en triphasé, biphasé ou monophasé. Ces raccordements sont nécessités par suite de raisons variables, souvent la création d'une grande usine centrale devant desservir économiquement plusieurs réseaux anciennement indépendants, ou encore le désir d'avoir un secours possible d'un réseau par un autre.

2. — Certaines applications nécessitent des fréquences spéciales et il est commode quelquefois de prendre le courant nécessaire à une distribution existante, de fréquence normale. Cer-

Digitized by Google

tains appareils d'éclairage ne s'adaptent pas bien à la fréquence 25; une fréquence plus élevée que 50 a été recommandée dans certains cas.

Les appareils utilisant les effluves, comme ceux destinés à la stérilisation par l'ozone ou à certaines oxydations, exigent, pour avoir le meilleur rendement, des fréquences de l'ordre 300 à 500, peu transportables et devant être fabriquées sur le lieu même d'utilisation.

La Télégraphie sans fil, et plus tard sans doute la Téléphonie, exigeront la création de fréquences 500 à 1000, dites musicales.

On aura donc quelquefois à engendrer des courants à ces fréquences spéciales en prenant l'énergie à un réseau alternatif livrant les fréquences ordinaires.

3. — Les cas que nous venons d'examiner sont ceux où l'on doit transformer l'une dans l'autre deux fréquences invariables; mais il est des cas où l'on désire utiliser de l'énergie électrique livrée à fréquence variable en la transformant à fréquence constante. Si l'on a un moteur asynchrone, dont on doit faire varier la vitesse, on peut absorber dans les rhéostats une puissance issue du rotor proportionnelle à la réduction de vitesse désirée; si le moteur est important, cette dissipation d'énergie peut être suffisante pour justifier l'addition d'un appareil transformant l'énergie livrée par les bagues du rotor à fréquence réduite et la restituant au réseau alimentant le stator.

4. — Inversement, on peut recevoir de l'énergie électrique à fréquence constante et avoir besoin de l'utiliser à fréquence variable. Ceci s'appliquera notamment au même problème que ci-dessus, c'est-à-dire à l'alimentation de moteurs asynchrones dont on désire faire varier la vitesse. Le démarrage se fera à fréquence et tension très réduites, ce qui permettra l'emploi de moteurs à rotor en court-circuit, qui, dans ces conditions, auront des couples importants sans absorption de courants exagérés.

5. — Les appareils opérant la transformation de la fréquence peuvent être rotatifs ou statiques. On peut remarquer que la transformation de polyphasé en polyphasé se fait à puissance constante des deux côtés et n'exige par conséquent aucune accumulation et restitution successives d'énergie. La transformation de polyphasé en monophasé ou inversement, ou bien de monophasé en monophasé, exige, au contraire, des accumulations et restitutions à cause de la variation cyclique de la

Digitized by Google

puissance monophasée: si les appareils sont rotatifs, la force vive peut constituer cette réserve; si les appareils sont statiques, l'accumulation ne peut se faire que dans des inductances ou des capacités: on doit donc s'attendre à de mauvais facteurs de puissance s'il n'y a pas de condensateur.

6. — Quel que soit le mode d'appareil choisi, il sera délicat de raccorder deux réseaux de fréquence différente au moyen d'un appareil fonctionnant en parallèle des deux côtés, absorbant ou livrant de l'énergie à l'un et l'autre de ces réseaux; l'appareil devrait, dans ce cas, tenir compte des variations inévitables de fréquence, de phase, de tension, de chacun des réseaux, ce qui sera généralement difficile, sinon impossible.

Nous allons passer en revue les principales applications des transformateurs de fréquence en décrivant brièvement dans chaque cas les appareils les mieux appropriés.

II.

Appareils transformant la fréquence pour le raccordement de deux réseaux.

A) *Appareils d'emploi industriel courant.*

7. — L'appareil transformateur de fréquence le plus immédiat est constitué par la réunion de deux alternateurs synchrones montés sur le même axe. On peut arriver à un ensemble très compacte, ne comportant souvent que deux paliers. Cet appareil est éminemment réversible, c'est-à-dire qu'il peut transformer la fréquence faible en fréquence élevée ou inversement. Il se prête fort bien à la production de courants déwattés, de sorte que le moteur peut servir à améliorer le facteur de puissance du réseau auquel il est relié. L'ensemble peut porter une petite excitatrice en bout d'arbre pour l'excitation des deux machines. L'inconvénient le plus sérieux est souvent le démarrage. On peut selon les cas recourir à différents procédés, variables avec l'installation. Si on démarre par le courant alternatif envoyé dans l'une ou l'autre des machines, il faut, dans ce cas, les munir d'amortisseurs appropriés: le courant absorbé est toujours assez considérable. Même en réduisant la tension avec un transformateur donnant juste celle qui est nécessaire au démarrage, on absorbe au réseau un courant généralement

Digitized by Google

plus grand que le courant normal, avec un facteur de puissance assez bas, de l'ordre de 0,4. Il faut aussi, si l'excitation comporte un grand nombre de spires, c'est-à-dire est prévue pour tension continue assez forte, tenir compte des tensions élevées induites dans les bobines en renforçant considérablement l'isolement ou opérant des sectionnements du circuit. La machine démarre comme moteur asynchrone et devient ensuite synchrone grâce aux pôles saillants qui déterminent des réluctances magnétiques variables suivant les différents rayons.

A cause du manque de graissage des paliers, le couple nécessaire au démarrage est assez élevé : on doit l'évaluer, dans les machines constituées comme le sont généralement les transformateurs de fréquence, à 30 kgm. par tonne de rotor. On peut réduire considérablement ce chiffre en envoyant de l'huile sous pression dans les coussinets avec une petite pompe, simplement à main quelquefois.

On peut, dans le but d'absorber un courant moins intense, employer un petit moteur asynchrone calé en bout d'arbre. Ce moteur auxiliaire aura un nombre de pôles plus faible que la machine synchrone principale de même fréquence et on réglera son glissement pour synchroniser. Afin de pouvoir démarrer dans tous les cas au moyen de l'une ou l'autre des fréquences, on a fait des groupes où ce moteur auxiliaire est à nombre de pôles variable.

On a aussi, dans d'autres cas, employé le démarrage par le courant continu pris à une batterie ou autre source disponible : ce courant est alors envoyé dans l'excitatrice.

Lorsqu'on veut relier deux réseaux ou mettre en parallèle deux groupes, il faut bien observer que la synchronisation d'une des machines d'un groupe n'entraînera pas forcément celle de l'autre : il n'y a qu'une certaine proportion de chances pour qu'il en soit ainsi, proportion variable avec les deux nombres de pôles. Il faut aussi que les différents groupes devant marcher en parallèle aient des bobinages, encoches, connexions, disposés bien uniformément sur toutes les machines pour assurer une bonne mise en phase des deux côtés. On a souvent, à cet effet, monté les stators sur un dispositif permettant une certaine rotation.

Dans la marche en parallèle de ces groupes, la variation d'excitation ne change guère la répartition des courants wattés ; au contraire, elle agit directement sur les courants déwattés. Il

Digitized by Google

est donc nécessaire que les machines devant marcher en parallèle soient bien prévues pour avoir une bonne répartition des charges wattées.

8. — Dans le but d'obtenir plus simplement le démarrage, on a remplacé quelquefois une des machines synchrones par une machine asynchrone: le groupe comporte alors généralement trois paliers. Cette solution est surtout possible lorsqu'on désire toujours prendre de la puissance à une des fréquences et toujours en livrer à la seconde fréquence. On pourrait évidemment faire l'inverse en rendant la machine asynchrone génératrice; mais cela est généralement impossible ou peu recommandable. A cause du glissement, la fréquence secondaire varie de quelques unités pour cent. Lorsque de tels groupes marchent en parallèle, les charges relatives sont déterminées par la nécessité de l'obtention de glissements égaux.

Lorsqu'une usine comporte des groupes asynchrones-synchrones et synchrones-synchrones, la marche en parallèle des deux types est impossible, les premiers restant toujours à vide. Cependant on peut passer facilement d'un type à l'autre: si, par exemple, un groupe moteur asynchrone-générateur synchrone est en marche, on lancera au synchronisme le groupe synchrone-synchrone; les deux génératrices synchrones ne pourront être en phase continuellement; mais, au moyen d'un synchroniseur, on pourra fermer l'interrupteur du groupe synchrone-synchrone au moment où la différence de phase sera nulle, les fréquences pouvant différer quelque peu. Le groupe synchrone-synchrone prendra immédiatement toute la charge, l'autre se mettant à vide. Nous avons vu ce cas dans une station où l'on reçoit de la fréquence 25 et où on doit fournir de la fréquence 50, ce qui se fait avec un groupe comportant un moteur asynchrone à 25 périodes; un moteur mécanique actionne en plus deux alternateurs synchrones, l'un à 25, l'autre à 50 périodes, formant un transformateur de fréquence synchrone, aussi bien qu'une réserve pour les deux réseaux.

B) *Appareils n'ayant fait l'objet que d'applications restreintes ou d'essais.*

9. — On a aussi employé des appareils reposant sur le principe suivant: Un moteur asynchrone alimenté à la fréquence à transformer est lancé à une certaine vitesse imposée: le rotor

Digitized by Google

est alors le siège de f. é. m. de fréquence différente de celle du stator. Le moteur actionnant le rotor à cette vitesse peut être un moteur synchrone. Par exemple, si un moteur synchrone ayant quatre pôles est alimenté sous 25 périodes par seconde, il tourne à 750 tours par minute: s'il actionne le rotor d'un moteur asynchrone dont le stator est également relié à la ligne de 25 périodes, et comportant 6 pôles, c'est-à-dire ayant 500 tours par minute comme vitesse synchronique, la rotation ayant lieu en sens inverse du sens de rotation normal du moteur asynchrone, le rotor se déplace par rapport au champ tournant avec une vitesse de 1250 tours par minute, ce qui donne une fréquence de $41\frac{2}{3}$ par seconde. Les stators absorberont des puissances inversement proportionnelles à leur nombre de pôles.

Les deux machines peuvent aussi être reliées en cascade. Le réseau de fréquence à transformer arrive dans le stator d'une machine asynchrone; le rotor de cette machine est en parallèle avec l'induit de la machine synchrone et avec le réseau secondaire. Par exemple, si les machines asynchrone et synchrone ont le même nombre de pôles et que l'on envoie de la fréquence 50 dans le stator asynchrone, on tourne à moitié vitesse de synchronisme, et on recueille de la fréquence 25 au secondaire. Le stator asynchrone absorbe la puissance totale et la transforme en deux portions égales, l'une induite dans le rotor grâce à la vitesse relative de ce rotor et du champ tournant; l'autre est la puissance mécanique actionnant la machine synchrone débitant à la fréquence 25 sur le réseau secondaire parallèlement avec le rotor asynchrone. On peut remarquer que la partie synchrone peut être faite à induit tournant et inducteurs fixes et que l'on peut ajouter un collecteur à l'induit synchrone afin de prendre le courant continu nécessaire à l'excitation. Sous cette forme on a un appareil de schéma identique à celui de la machine plus récente de MM. LEBLANC & ARNOLD dite " Commutatrice en Cascade „. Les appareils de ces types ont dans certains cas quelques avantages sur les simples groupes ordinaires de deux machines, mais ils comportent toujours deux machines complètes et séparées; quoique connus depuis fort longtemps, ils ne se sont guère développés jusqu'ici.

10. — Nous avons, en collaboration avec M. BOUCHEROT, préconisé en 1910 l'emploi de machines plus simples. On peut remarquer qu'il est possible de disposer sur un même circuit magnétique, composé d'un stator et d'un rotor, deux enrou-

Digitized by Google

lements sur chacune de ces parties, l'un des enroulements étant de n_1 pôles, l'autre de n_2 pôles. On arrive à créer des enroulements tels que l'enroulement du rotor créant n_2 pôles n'induise aucune f. é. m. dans l'enroulement du stator de n_1 pôles et inversement. On peut avec ce dispositif réaliser des alternateurs donnant à la fois deux fréquences différentes, de tensions réglables toutes deux; mais cela est aussi immédiatement applicable aux transformateurs de fréquence. Dans le cas où l'on désire avoir un groupe synchrone, le stator portera deux enroulements correspondant aux deux nombres de pôles déterminés par la vitesse adoptée et les fréquences à transformer; on pourra souvent adopter un bobinage avec sections du genre de celles des machines à courant continu et avec même pas pour les deux bobinages, ce qui simplifie beaucoup l'enroulement; ce pas sera choisi de préférence tel que chaque encoche renferme deux couches de fil appartenant l'une à un bobinage, l'autre au second, de telle sorte qu'on profitera de la division totale de la machine par les encoches dans un cas et dans l'autre. Le rotor sera parcouru par du courant continu: on supposera d'abord un bobinage réparti de n_1 pôles, et un second de n_2 pôles; puis on remarquera que dans chaque région il y a des conducteurs parcourus par des courants d'un sens et de l'autre; on joindra donc ou on supprimera les conducteurs dont les actions s'ajoutent ou se retranchent. Finalement on aura un bobinage unique, d'aspect spécial quoique souvent simple, aboutissant à 2 bagues, et tel qu'il puisse servir d'inducteur à la fois aux deux circuits de stator de n_1 et n_2 pôles; on pourra, si nécessaire, grouper cet inducteur en deux portions aboutissant à trois ou quatre bagues afin de faire varier le courant continu dans ces deux portions et obtenir un certain réglage de la tension secondaire ou du facteur de puissance primaire.

Les premières applications de ce genre de machines sont actuellement en construction.

On pourrait remplacer l'inducteur par une simple cage d'écureuil et obtenir un groupe asynchrone prenant de la puissance wattée sur un réseau, livrant de la puissance wattée à un autre réseau de fréquence différente, mais absorbant de la puissance déwattée des deux côtés. On pourrait aussi avoir une solution mixte avec un rotor synchrone de n_1 ou n_2 pôles muni d'une cage d'écureuil. Ces derniers appareils ne peuvent s'employer que dans des cas spéciaux.

Digitized by Google

Ces transformateurs de fréquence sans couple sur l'arbre seront souvent beaucoup plus économiques et de meilleur rendement que les groupes de machines. Il y a des points où les flux de n_1 et n_2 branches déterminent des inductions qui s'ajoutent tandis qu'elles se retranchent en d'autres; mais en prévoyant judicieusement la superposition de ces flux, on arrive à n'avoir pas besoin d'avoir une section correspondant à la somme des inductions maximum. On peut remarquer aussi que dans des cas comme celui de la transformation de la fréquence 25 en fréquence 40, 50 ou 60, il suffira d'ajouter peu de fer à une machine de 25 périodes pour permettre en sus le passage du flux d'une machine de même puissance à ces fréquences plus élevées.

III.

Moteurs asynchrones à fréquence constante et vitesse variable.

11. — Ce problème correspond à l'utilisation de la puissance issue du rotor d'un moteur asynchrone tournant au-dessous du synchronisme en la renvoyant sur le réseau, c'est-à-dire en transformant sa fréquence.

On pourrait dire que cet appareil peut être constitué par le collecteur que l'on ajoute souvent au rotor des moteurs asynchrones, le rôle du collecteur comme transformateur de fréquence étant bien connu.

Il est possible aussi de recueillir les courants issus du rotor d'un moteur ordinaire principal et les envoyer dans un groupe transformateur de fréquence avant de les retourner au réseau: comme type du genre d'appareils pouvant être utilisés, nous pouvons citer le transformateur SCHERBIUS, consistant en un moteur à collecteur alimenté par les circuits du rotor principal entraînant une génératrice asynchrone à rotor fermé sur lui-même, une cage d'écureuil si l'on veut, dont le stator est en dérivation sur le réseau. En réglant par un transformateur le rapport des tensions admises au stator et au rotor du moteur à collecteur on fait varier la vitesse du moteur principal.

On peut encore se servir d'un induit à collecteur analogue à celui d'une commutatrice où les courants issus du rotor prin-

Digitized by Google

cipal arrivent aux bagues: le stator est un simple anneau de fer sans enroulement; on peut même supprimer l'entrefer et faire tourner cet anneau fermant le flux du rotor de sorte que tout l'appareil soit mobile. En le faisant tourner au moyen de l'arbre du moteur principal, on recueille entre les balais appuyant sur le collecteur des f. é. m. de fréquence égale à celle du réseau, c'est-à-dire que l'on peut récupérer. Il est aussi possible d'envoyer le courant issu du rotor principal aux balais appuyant sur le collecteur pour recueillir aux bagues la fréquence du réseau. La première solution a l'avantage de permettre la suppression complète des bagues du moteur principal et du transformateur de fréquence par réunion directe des rotors; elle a l'inconvénient de commuter à fréquence élevée. Nous passons rapidement sur ces appareils, qui, quoique étant de véritables transformateurs de fréquence, sont un peu en dehors du cadre de ce rapport et sont d'ailleurs traités dans certains autres. Quelques applications industrielles ont déjà été faites dans cette voie, notamment selon le procédé SCHERBIUS.

L'appareil imaginé par M. BOUCHEROT et nous-mêmes, dont nous avons parlé ci-dessus (§ 10), comportant un circuit magnétique unique avec flux de n_1 et n_2 branches superposées, peut aussi convenir pour la récupération sur le réseau de l'énergie issue du rotor. Cet appareil peut, dans ce cas, être fait avec rotor à simple cage d'écureuil: pour augmenter le facteur de puissance, une des fonctions peut être synchrone. Le stator portera donc un enroulement de n_1 pôles connecté au réseau, et un autre de n_2 pôles connecté au rotor du moteur principal. Si $n_1 = n_2$, on aura demi-vitesse synchronique au moteur principal; si $n_1 = 3\ n_2$, on aura $^2/_3$ de vitesse synchronique au moteur principal. Si l'enroulement N° 2 est constitué de telle sorte qu'il puisse facilement se transformer de n'_2 en n''_2 pôles, on aura ainsi réalisé 3 vitesses du moteur principal sans dissipation d'énergie dans des résistances.

Disons en passant que l'on pourrait combiner ce dispositif avec le transformateur de phases FERRARIS dans le but de faire de la traction monophasée sans aucun collecteur. Une des phases de l'enroulement biphasé de n_1 pôles serait alimentée par la ligne monophasée: on recueillerait des courants en quadrature sur la seconde phase, de telle sorte que les moteurs de traction seraient alimentés en biphasé moitié par la ligne directement, moitié par le déphaseur. L'énergie du rotor des moteurs de

Digitized by Google

traction serait envoyée dans l'enroulement de n_2 pôles, et par n_1 se ferait le renvoi à la ligne de la puissance issue des rotors principaux. Ceci sortant également du sujet à traiter dans ce rapport, nous ne nous y étendrons pas plus. Aucun essai n'a encore été fait.

IV.

Moteurs asynchrones à fréquence variable.

12. — Il est possible aussi de faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone en l'alimentant à fréquence variable, la tension variant en même temps de manière que le flux conserve la même valeur. On pourrait ainsi facilement, par ce procédé, faire de la traction (monophasée ou polyphasée) avec de simples moteurs à cage d'écureuil.

Nous avons, en collaboration avec M. GRATZMULLER, préconisé quelques dispositifs dans cette voie (1904).

On peut employer l'appareil décrit ci-dessus, consistant en un induit de commutatrice alimenté par la ligne entre bagues et donnant aux balais appuyant sur le collecteur des fréquences variables avec la vitesse et des tensions variables avec l'écartement des balais. L'appareil est mû par un moteur auxiliaire à vitesse variable.

On peut encore employer comme transformateur de fréquence un appareil construit comme un moteur à cage d'écureuil alimenté en monophasé ou en polyphasé, c'est-à-dire tournant à vide aux environs du synchronisme. Le stator porte en plus un collecteur relié à ses sections ou à un second bobinage, de la manière ordinairement adoptée dans les enroulements à courant continu. En faisant tourner des balais à vitesse variable, on recueillera des fréquences d'autant plus basses que la vitesse sera plus grande. On pourra évidemment remplacer la rotation des balais par une disposition donnant les mêmes déplacements relatifs.

Aucune application importante n'a encore été faite dans cette voie.

Digitized by Google

V.

Appareils statiques.

13. — Les appareils statiques n'ont eu jusqu'à présent que peu d'applications: ils ne se prêteraient d'ailleurs qu'à des emplois limités, comme l'alimentation d'appareils d'éclairage ou de télégraphie sans fil. Certaines combinaisons sont actuellement l'objet d'études sérieuses en vue d'applications industrielles.

Comme types de ces appareils nous pourrons citer les dispositifs de M. JOLY, qui paraissent les plus avancés dans la voie industrielle.

Le doubleur de fréquence consiste en deux transformateurs monophasés ayant leurs primaires en série et reliés à la ligne de fréquence f. Les secondaires sont en série et en opposition, de telle sorte que la f. é. m. de fréquence f entre bornes soit nulle. Chaque transformateur porte un troisième enroulement traversé par du courant continu, afin que ces ampère-tours continus s'ajoutent aux ampère-tours alternatifs dans un appareil à l'instant où ils se retranchent dans l'autre, et inversement. On voit facilement que dans ces conditions on obtiendra entre bornes secondaires une f. é. m. de fréquence $2f$ (Académie des Sciences, 13 Mars 1911 et Lumière électrique du 20 Mai). M. JOLY ajoute à cet appareil une capacité en dérivation sur le circuit d'utilisation, en résonnance avec les secondaires pour la fréquence $2f$, afin de rendre maximum l'utilisation des appareils.

M. JOLY imagina de plus un tripleur de fréquence: les primaires de deux transformateurs sont reliés en série et les secondaires en opposition; mais l'un des appareils étant loin de la saturation ou à perméabilité constante, l'autre est fortement saturé. On recueille ainsi entre bornes secondaires une f. é. m. de fréquence $3f$, quelque peu mélangée de $5f$. De même que dans le cas du doubleur, un condensateur en résonnance rend maximum l'utilisation des appareils (Académie des Sciences, 27 Mars 1911).

On peut d'ailleurs faire disparaître les harmoniques supérieures à $2f$ ou $3f$ dans ces appareils au moyen d'étouffeurs spéciaux — self-inductions et condensateurs —.

Digitized by Google

Les premiers essais de ces appareils semblent encourageants: deux tripleurs permettraient d'obtenir avec la fréquence 50 celle de 450; trois appareils celle de 1350, c'est-à-dire les fréquences demandées actuellement pour la télégraphie et la téléphonie sans fil. Mr. G. VALLAURI vient d'exposer à l'Associazione Elettrotecnica Italiana (Mai 1911) un travail sur un doubleur de fréquence analogue, en envisageant différentes combinaisons relatives aux courants polyphasés: il donne quelques résultats expérimentaux. L'absence d'organes rotatifs rendrait ces appareils statiques particulièrement intéressants pour certaines applications de puissance modérée, mais, naturellement, dans des cas spéciaux seulement, l'utilisation des matériaux restant toujours assez basse.

Digitized by Google

Digitized by Google

Sezione II

IMPIANTI - CENTRALI - QUADRI - CONDOTTURE

Presidente	O. De Bast	(Belgio)
Vice Presidenti	J. Landry	(Svizzera)
	L. Ferraris	(Italia)
Segretari	E. Boccardo	(Italia)
	U. Del Buono	(Italia)

Digitized by Google

Digitized by Google

The selection of the transmission and distributing voltage, and the design of switchboards and sub-stations in large electric installations, taking into account both economy in first cost and continuity of service.

Rapporto sul tema N. 4 del Congresso

Relatore PHILIP TORCHIO (New York).

Arrangement of Subjects. — In the treatment of this report, the writer has divided the studies of transmission and distributing voltage into two separate sections and also adhered to the instructions of the Organizing Committee to deal *especially* with *extra high-tension voltages.*

Therefore, the *first part* of this report treats extensively of *long-distance power transmissions* and hydro-electric plants.

The *second part* deals more briefly with *ordinary transmitting* and *distributing voltages,* as used in steam plants or hydro-electric power receiving sub-stations.

Furthermore, for clearness of presentation, the studies in these two subdivisions have been restricted mainly to the economic and commercial questions, while the *purely constructive* or operating features have been treated separately in several Appendixes.

Digitized by Google

FIRST PART

Long Distance Transmissions.

Main Items Affected by Voltage. — In any hydroelectric power transmission problem, some of the important factors affecting the selection of the transmission voltage are of a local nature and cannot, therefore, be studied in a general report. The factors that can be classified as common to all problems are:

1. Cost of *Stations* and *Sub-stations.*
2. Cost of *transmission lines.*
3. Cost of station capacity used to provide *line transmission losses at maximum load.*
4. Value of relative *reliability* of *service.*

1. Cost of stations and sub-stations.

Neglecting all the items not affected by the transmission voltage, the main difference in cost will be due to:

(a) Transformers.
(b) High-tension switchboards.
(c) Lightning arresters.
(d) Building for above.

The importance of these four items will depend on the capacity of the plants; on the arrangement of apparatus and its connections; on the type of indoor or outdoor installations, and on the number of stations and sub-stations on the system.

As these conditions will vary in each individual case, we have made several comparative estimates of cost of these items for different types and sizes of stations and sub-stations on the basis of apparatus itemized in the following tables.

For characteristic details of construction the writer refers to Appendix I, illustrating typical designs of plants and apparatus built by the two largest manufacturing companies in the United States. (A complete description of the " commercial electrical apparatus for 100,000-volt service „ manufactured by the Westing-

Digitized by Google

house Electric & Manufacturing Company, is to be presented to this Congress by Mr. Hayes. Therefore, the writer has given a larger number of illustrations of General Electric Company's apparatus, especially when they offered salient points of interest to call for special attention).

Tables I, II and III give the estimates of cost of the items affected by voltage for voltages of 44,000, 66,000, 88,000 and 110,000 for stations of 10,000, 30,000 and 60,000 K. W. capacity, using in all cases Westinghouse apparatus.

Table IV gives similar estimates for stations of 20,000 and 40,000 K. W. capacity using General Electric apparatus, while Tables V, VI and VII give estimates for 40,000, 20,000 and 5,000 K. W. indoor and outdoor sub-stations using also General Electric apparatus.

Details of Estimates. — The prices of the Westinghouse transformers are based on transformers tested for twice *delta* voltage, while the General Electric prices are for transformers tested for twice *star* voltage.

All transformers are single-phase, 60-cycle, water-cooled units, capable of carrying 50 per cent. overload for two hours. Fire-proof barriers are used between each set of transformers. The installation of switches, busses and wiring is in all cases of the open-air type, without fire-proof barriers.

The oil switches are three-phase solenoid operated, each switch consisting of three single-phase units — the operating mechanisms of which are connected together mechanically.

In the Westinghouse designs the relays and ammeters are operated from current transformers mounted around the circuit-breaker bushings.

In the General Electric designs, when the switches are installed indoors, the series relays and ammeters are mounted on post insulators, which are in turn clamped to bases for wall mounting. For an outdoor installation the switches and relays are installed as a unit. The disconnecting switches are single-pole, single-throw units of the hand-operated type for indoor use, and of the bolt type for outdoor use. In the bolt type of switch three single-pole switches are operated as a unit by means of chain mechanism.

The lightning arresters are of the three-phase aluminum cell

Digitized by Google

type; each equipment consisting of four tanks with three horn gaps and choke coils.

In the outdoor installation, line insulators take the place of the post insulators and bus supports, which are used with the corresponding indoor installations.

The costs of buildings and installation were approximated for a set of local conditions, but may vary greatly for different localities.

Digitized by Google

TABLE I.—MAIN STATION (Indoor Type).

10,000 K. W.—2 Lines.

Transformers Tested for Twice Delta Voltage.

MATERIAL	110,000 Volts		88,000 Volts		66,000 Volts		44,000 Volts	
	Each	Total	Each	Total	Each	Total	Each	Total
7-1667 K.V.A. trans.....	$6,100	$42,700	$4,500	$31,500	$3,400	$23,800	$2,350	$17,850
21-Discon. Sw.....	112	2,350	34	714	26.50	556	18	378
4-Oil Sw.....	1,700	6,800	1,160	4,640	660	2,640	520	2,080
2-Elec. Lightning Arr. with Choke Coils....	2,440	4,880	2,100	4,200	1,350	2,700	780	1,560
2-Sets of Relays & Am..	305	610	270	540	230	460	175	350
6-Side wall bushings....	27	162	18	108	13	78	10	60
30-Suspension Insul.....	8.50	255	6.75	202	5	150	3.50	105
Bus Bars & Wiring...	316	316	278	278	243	243	200	200
Total Cost of Apparatus.....		$58,073		$42,182		$30,627		$22,583
Building		11,700		10,430		8,260		6,060
Installation		7,000		6,500		5,500		5,000
Total		$76,773		$59,112		$44,387		$33,643
Per K. W.....		7.68		5.91		4.43		3.36

Digitized by Google

TABLE II.—MAIN STATION (Indoor Type).

30,000 K. W.—2 Lines.

Transformers Tested for Twice Delta Voltage.

MATERIAL	110,000 Volts		88,000 Volts		66,000 Volts		44,000 Volts	
	Each	Total	Each	Total	Each	Total	Each	Total
7-5000 K.V.A. trans.....	$9,100	$63,700	$7,500	$52,500	$6,100	$42,700	$4,900	$34,300
21-Discon. Sw.....	112	2,350	34	714	26.50	556	18	378
4-Oil Sw.....	1,700	6,800	1,160	4,640	660	2,640	520	2,080
2-Elec. Lightning Arr....	2,440	4,880	2,100	4,200	1,350	2,700	700	1,560
2-Sets of Relays and Am.	305	610	270	540	230	460	175	350
6-Side Wall Bushings....	27	162	18	108	13	78	10	60
30-Suspension Insul.....	8.50	255	6.75	202	5	150	3.50	105
Bus Bars and Wiring..	—	345	—	300	—	260	—	216
Total Cost of Apparatus		$79,102		$63,204		$49,544		$39,049
Building		13,800		10,500		9,520		7,000
Installation		11,000		10,000		8,500		8,000
Total		$103,902		$83,704		$67,564		$54,049
Per K.W.		3.46		2.79		2.25		1.80

Digitized by Google

TABLE III.—MAIN STATION (Indoor Type).

60,000 K. W.—4 Lines.

Transformers Tested for Twice Delta Voltage.

MATERIAL	110,000 Volts		88,000 Volts		66,000 Volts		44,000 Volts	
	Each	Total	Each	Total	Each	Total	Each	Total
13-5,000 K.V.A. trans....	$9,100	$118,300	$7,500	$97,500	$6,100	$79,300	$4,900	$63,700
48-Discon. Sw.	112	5,376	34	1,632	26.50	1,272	18	864
9-Oil Sw.	1,700	15,300	1,160	10,440	660	5,940	520	4,680
4-Elec. Lightning Arr...	2,440	9,760	2,100	8,400	1,350	5,400	780	3,120
4-Sets of Relay & Amm..	305	1,220	270	1,080	230	920	175	600
12-Side Wall bushings...	27	324	18	216	13	156	10	120
60-Suspension Insul.	8.50	510	6.75	405	5	300	3.50	210
Bus Bars and Wiring..	—	700	—	635	—	534	—	410
Total Cost of Apparatus		$151,490		$120,308		$93,822		$73,704
Building		21,800		16,070		13,000		10,430
Installation		12,000		11,000		9,500		9,000
Total		$185,290		$147,378		$116,322		$93,134
Per K.W.		3.09		2.46		1.94		1.55

Digitized by Google

TABLE IV.

Main Stations—20,000 and 40,000 K. W. (Indoor Type).
Transformers Tested for Twice Star Voltage.

MATERIAL	110,000 Volts		44,000 Volts	
	Price each	Total	Price each	Total
20,000 K. W.—4 Lines.				
13—1,666 KVA Transformers	$4,300	$55,900	$3,500	$45,500
9—Oil Switches	1,510	13,600	650	5,850
9—Series Relays	130	1,170	100	900
4—Lightning Arresters and Choke Coils	2,325	9,300	785	3,140
36—Roof Entrance Bushings	175	6,300	80	2,880
138—Post Insulators	15	2,070	6	828
250—Bus Supports	12	3,000	10	2,500
12—Line Ammeters	37.50	450	27	325
Total Cost of Apparatus		$95,750		$63,643
Building		24,000		11,500
Installation		11,000		8,000
Total		$130,750		$83,143
Per K. W.		6.53		4.15
40,000 K. W.—4 Lines.				
13—3,333 KVA Transformers	$7,000	$91,000	$5,200	$67,600
9—Oil Switches	1,510	13,600	650	5,850
9—Series Relays	130	1,170	100	900
4—Lightning Arresters and Choke Coils	2,325	9,300	785	3,140
36—Roof Entrance Bushings	175	6,300	80	2,880
138—Post Insulators	15	2,070	6	828
250—Bus Supports	12	3,000	10	2,500
12—Line Ammeters	37.50	450	27	325
Total Cost of Apparatus		$130,850		$85,743
Building		24,000		11,500
Installation		11,000		8,000
Total		$165,850		$105,243
Per K. W.		4.14		2.63

Digitized by Google

TABLE V.

Sub-Station 40,000 K. W.—2 Lines.

Transformers Tested for Twice Star Voltage.

MATERIAL	110,000 Volts				44,000 Volts	
	Indoor		Outdoor		Indoor	
	Price each	Total	Price each	Total	Price each	Total
13—3333 K.V.A. Transformers	$7,000	$91,000	$7,500	$97,500	$5,200	$67,600
7—Oil Switches	1,510	10,570	2,200	15,400	650	4,550
7—Series Relays	130	910			100	700
30—Disconnecting Switches	60	1,800	175	5,250	26	780
2—Lightning Arresters and Choke Coils	2,325	4,650	3,370	6,740	735	1,570
12—Roof Entrance Bushings	175	2,100			80	960
100—Post Insulators	15	1,500	18	5,400	6	600
200—Bus Supports	12	2,400			10	2,000
18—Series Line Ammeters	37.50	675	50	900	27	486
Total Cost of Apparatus		$115,605		$1,311,190		$79,246
Building for above		18,000		6,600		11,500
Installation		11,000		9,500		8,000
Total		$144,605		$147,290		$98,746
Per K.W.		3.61		3.68		2.47

Digitized by Google

TABLE VI.

Sub-Station 20,000 K. W.—2 Lines.

Transformers Tested for Twice Star Voltage.

MATERIAL	110,000 Volts				44,000 Volts	
	Indoor		Outdoor		Indoor	
	Price each	Total	Price each	Total	Price each	Total
7—3333 K.V.A. Transformers	$7,000	$49,000	$7,500	$52,500	$5,200	$36,400
4—Oil Switches	1,510	6,040	2,200	8,800	650	2,600
4—Series Relays	130	520			100	400
21—Disconnecting Switches	60	1,260	175	3,675	26	546
2—Lightning Arresters and Choke Coils	2,325	4,650	3,370	6,740	785	1,570
12—Roof Entrance Bushings	175	2,100			80	960
100—Post Insulators	15	1,500	18	4,050	6	600
125—Bus Supports	12	1,500			10	1,250
6—Series Line Ammeters	37.50	225	50	300	27	162
Total Cost of Apparatus		$66,795		$76,065		$44,488
Building for above		10,000		5,700		5,850
Installation		6,600		6,800		5,000
Total		$83,395		$88,565		$55,338
Per K.W.		4.17		4.41		2.76

Digitized by Google

TABLE VII.

Sub-Station 5,000 K. W.—2 Lines.

Transformers Tested for Twice Star Voltage.

MATERIAL	110,000 Volts				44,000 Volts	
	Indoor		Outdoor		Indoor	
	Price each	Total	Price each	Total	Price each	Total
3—1666 K.V.A. Transformers	$4,300	$12,900	$4,600	$13,800	$3,500	$10,500
3—Oil Switches	1,510	4,530	2,200	6,600	650	1,950
3—Series Relays	130	390			100	300
15—Disconnecting Switches	60	900	175	2,625	26	300
2—Lightning Arresters and Choke Coils	2,325	4,650	3,370	6,740	785	1,570
12—Roof Entrance Bushings	175	2,100			80	960
100—Post Insulators	15	1,500	18	3,600	6	600
100—Bus Supports	12	1,200			10	1,000
9—Series Line Ammeters	37.50	338	50	450	27	243
Total Cost of Apparatus		$28,508		$33,815		$17,513
Building for above		5,250		3,200		2,700
Installation		3,500		4,500		3,000
Total		$37,258		$41,515		$23,213
Per K.W.		7.45		8.30		4.64

Digitized by Google

2. Cost of transmission lines.

The variables of this item of cost are so many and great that it would be impracticable to briefly lay down general rules of comparison. We shall confine ourselves only to giving two comparative estimates of costs of two lines, both using double circuit steel towers, but one designed for 44,000 volts pin insulators and the other 110,000 volts suspension insulators. The type and design of these towers are illustrated in Figs. 42 and 43 of *Appendix I.*

COST PER MILE.

2-3-Phase Circuits with Ground Wire.

MATERIAL	44,000 Volts	110,000 Volts
Towers	$ 1,100.00	$ 1,700.00
Hardware	85.00	110.00
Ground Wire	52.00	52.00
Insulators	80.00	320.00
Erection and Hauling	400.00	400.00
Right of Way and Clearing	500.00	400.00
Stringing	175.00	175.00
Telephone	275.00	275.00
No. 250,000 C.M. Copper Cable	3,454.30	.....
No. O B & S	.....	1,458.60
Total	$ 6,121.30	$ 4,990.60
Difference per mile		$ 1,130.70

Details of Estimate. — The towers have a spacing of ten per mile; all towers are 50 feet to the lowest conductors. The 44,000-volt tower weighs approximately 2,700 pounds; the 110,000-volt tower, approximately 4,000 pounds. The towers are set in earth without concrete.

The right-of-way will, of course, vary with different localities. The sizes of conductors were figured for same current density, and the cost on a basis of 14.3c. per pound of stranded copper conductor.

Digitized by Google

3. Cost of station capacity to provide line transmission losses at time of maximum load.

Often one is liable to take a too narrow point of view in fixing the value of this item in the discussion of high-tension transmissions. Even the basis of using the average cost per K. W. of station capacity is unwarranted under the conditions of practice for the following reasons:

(a) Usually a plant will not dispose of the output up to its total maximum capacity until several years after the original installation has been made.

(b) The conditions of yearly maximum load on a system are of short duration, therefore not requiring the same steady use of water power nor the low limits of temperature rise in machines as required for the steady and continuous loads.

(c) Any system must have at all times a liberal reserve of machinery and transmitting lines over and above the actual maximum customers' load, this reserve being considerably in excess of any difference between line losses for different transmitting voltages possible in practice.

It would, therefore, be a mistake to capitalize in any comparison the saving in line losses on the basis of the average cost per K. W. of installation.

The writer has suggested the use of an increment cost equal to one-half of the average cost per K.W. of total installation (*).

Aside, however, from the money value of the line losses at maximum load, the requirements of *regulation* (and, for long transmissions, the voltage limits of operation of receiving synchronous and induction apparatus) will determine the maximum line losses allowable, and to some extent the transmission voltage of line conductors are designed for maximum economy as governed by Thomson's law.

On the other hand, physical limitations like disruptive strength of air and corona losses of conductors, climatic and altitude conditions traversed by line may determine the upper limit of practical voltages.

(*) See discussion of Mr. Mershon's paper on " The Maximum Distance to Which Power Can Be Economically Transmitted „. — Transactions A. I. E. E. — year 1904.

Digitized by Google

4. Value of relative reliability of service.

Experience shows that the majority of interferences with the continuity of service are due to causes extraneous to the transmission voltage. Outside of these extraneous interferences, the consideration of the relative reliability of transmission voltages rests intrinsically, not on the value of the voltage itself, but mainly on the fact that the system must be protected against the abnormal and transient voltage strains due to surges and lightning which may be or are entirely independent of the working voltage. From this point of view it follows that, *other things being equal*, the higher the transmission voltage the higher is the reliability of service. On the whole, actual experience confirms this view as the operating reports of several extra high-tension systems, given in *Appendix II*, would indicate.

It would, therefore, appear that, as reliability of service of transmission systems depends to a certain measure upon the amount of insulation offered by the system against transient higher voltages, extra high-tension lines and apparatus will gradually become more generally used and standardized in all large installations, with a consequent tendency to increase the working voltage to secure whatever economies of copper these higher voltages will afford.

Conclusions — First part: Long distance transmissions.

Summarizing the results of our analysis, we may conclude that in large installations:

(a) The selection of the transmission voltage will be primarily governed by the difference between the *savings* in *costs of lines* and *transmission losses* due to higher voltages and the correspondent *extra cost* of apparatus at the stations and sub-stations. This cost will necessarily increase with the number, and decrease in size, of sub-stations, so that, where the primary transmission lines are to be tapped for distribution at many points, the extra high-tension voltages may become economically impracticable.

(b) Extra high-tension systems are at least as reliable as

Digitized by Google

lower voltage systems, and, in respect to protection against transient surges and lightning, possess material points of superiority.

(c) The use of extra high-tension insulation for lines and apparatus on lower working voltage systems will raise their factor of safety, and it is, therefore, advisable in important installations.

SECOND PART

The Selection of Distributing Voltage.

Under this heading reference is made to ordinary systems as used for power transmission and distribution from large local plants. These are usually steam plants, or hydro-electric power receiving sub-stations, supplying large amounts of power to distribution systems in the immediately surrounding territory.

Standard Practice. — The standard transmitting voltages from these plants are 6,600, 11,000 and 13,200 volts. The transmission lines are usually underground, using three conductor cables drawn in subway ducts, which is the practice for all underground systems of distribution in the United States. Armored cables laid in earth, prevalent in Europe, are hardly ever used in America, except for crossing rivers and special services.

1. Cost of stations and sub-stations.

In all large plants operating from 6,000 to 13,200 volts the general practice is to isolate each phase of the busses, leads and oil switches by fireproof compartments. *See Appendix III* for illustrations and details.

From the standpoint of cost of station and sub-station apparatus and switchboards the differences between 6,600 and 13,200 volt systems are very minor and would not influence materially the selection of the transmission voltage.

Digitized by Google

2. Transmission lines and losses.

Comparisons to be practical must be made for cables operating at different voltages, but having the same outside diameter and each transmitting the same amount of power.

6,600 vs. 11,000 Volts. — For same outside diameter, a standard 3 coreround conductor cable for 6,600 volt service has about twice the copper and two-thirds the insulation of an 11,000 volt cable. Both cables would transmit the same amount of power with *line losses* approximately 50 % *larger* for the 6,600 volt cable than for the 11,000 volt cable. The latter would *cost*, at present, 12 % less than the 6,600 volt cable. This theoretical saving in cost of cables, if applied, for instance, to the New York Edison system, would amount to about $ 1.25 per K.W. maximum load.

6,600 vs. 13,200 Volts. — We may operate the above 11,000 volt cable at 13,200 volts and compare it with a 6,600 volt sector cable of same outside diameter built with 2 ½ times the copper and two-thirds the insulation of the former. With this amount of insulation the factor of safety of the 6,600 volt cable would be higher. Both cables would transmit the same power, but the *line losses* would be 60 % *larger* for the 6,600 volt cable. Also, the 13,200 volt cable would, at present, *cost* 30 % *less* than the 6,600 volt cable. This theoretical saving in cost of cables, if applied, for instance, to the New York Edison system, would amount to about $ 3.00 per K. W. maximum load.

Limits of Line Regulation. — In installations where the centre of gravity of the distributing system is at considerable distance from the transmitting station, the limits of regulation allowable on the line may limit the amount of power that a cable can transmit at 6,600 volts, thereby modifying the above comparisons more in favor of the higher voltages.

3. Comparisons applied to a large installation.

6,600 vs. 11,000 Volts. — In the case of the New York Edison 6,600 volt system, operating with a 30 % yearly load factor: — average length of feeders = less than 3 miles.

Digitized by Google

(a) Saving in station capacity = 1,500 K. W.
(b) Saving in energy = 2,400,000 K. W. Hrs.

Estimating the yearly value of the above items on the basis of:

(a) 50 % of the average cost per K. W. of station capacity and 12 % for interest and depreciation, and

(b) Increment cost of *coal only*, for the energy losses,

the yearly saving in favor of 11,000 volts would be $ 16,200 = $ 0.08 per K. W. maximum load, to which must be added, say, 8 % interest and depreciation on the $ 1.25 per K. W. saving in cost of cables, giving a total yearly saving of $ 0.18 per K. W. maximum load in favor of the 11,000 volt system.

6,600 vs. 13,200 Volts. —

(a) Saving in station capacity = 1,680 K. W.
(b) Saving in energy = 2,600,000 K. W. Hrs.

On the previous basis of estimating, the value of the above two items would amount to $ 18,000 = $ 0.09 per K. W. maximum load, to which must again be added the 8 % interest and depreciation on the $ 3.00 per K. W. saving in cost of cables, giving a total yearly saving of $ 0.33 per K. W. maximum load in favor of the 13,200 volt system.

4. Step-up transformers for long feeders.

In several large installations, distributing the bulk of the current at the generating voltage, step-up transformers are used to raise the voltage for a portion of the current to be transmitted to greater distances, like the outlying districts and towns around a city. In Boston the voltage is raised to 13,800 volts; in Chicago to 22,000, etc. In the majority of cases the higher voltage lines are installed partly underground and partly overhead. In such instances the *protection* against lightning disturbances *afforded by* the *step-up transformers*, eliminating the metallic connection between the main system and the mixed underground and overhead lines, is fully as *important and desirable* as the savings in transmission of these high-voltage lines.

Digitized by Google

5. Value of relative reliability of service of 6,600 to 13,200 volt systems.

Voltages from 6,000 to 9,000 are extensively used by the largest lighting companies, and 11,000 volts by railway companies. Comparatively few large stations generate at 13,200 volts. For smaller installations and suburban districts 13,200 volt distribution is extensively used.

In large stations experience has repeatedly shown that the lower voltage systems better withstand high potential disturbances than the corresponding higher voltage systems.

Furthermore, in the development of the modern high speed and large power generators of low instantaneous short circuit reactance, the designer is almost compelled to use lower voltage windings to secure high dielectric and mechanical strength for the rigid service requirements of such units. As an illustration of this tendency, in *Appendix III* is shown the design of the new station of the Commonwealth Edison Company of Chicago, using 20,000 K. W., 4,500 volt generators with 4,500 volt high reactance auto-transformers in series with the generator leads. On the other hand, with the use of these auto-transformers, in conjunction with lower voltage generators, it is expected that the reliability of high voltage systems will be materially increased so that high transmission voltages may eventually become relatively even more reliable than the present lower voltage systems with low reactance generators. The latter, however, if equipped with external reactances, as it is being done by the large Edison Companies in the United States, will probably always present advantages in station cost and in reliability of the system.

The value of this increased reliability would be of greater importance to a lighting and power system than to a railway system on account of the more rigid requirements of the former.

Conclusions — Second part: Selection of distributing voltage.

In large long distance power receiving sub-stations or local steam plants the cost of stations and sub-stations is not mate-

Digitized by Google

rially affected by the distribution voltage. The selection of the distributing voltage is governed by the following considerations:

(a) The relative *cost of cables.* It depends on the *average length of feeders* on the main system (and the *limit of line regulation* this service allows), and also upon the possible use of step-up transformers for the long feeders.

(b) The relative *power* and *energy* transmission losses. The saving in energy losses is of value only in the case of steam plants and will depend upon the *load factor* of the system.

(c) High speed large power generators require low voltage windings for high dielectric and mechanical factors of safety. The use of high reactance auto-transformers or external reactances will improve the reliability of the system.

(d) The greater reliability of lower voltage systems is more valuable to important lighting and power systems because of the greater commercial losses they would sustain in case of even momentary interruptions of service.

General remarks.

For the detail presentation of the construction and operating data relating to the questions discussed in the foregoing reports (and also for the treatment of the other subjects specified in the title of this paper, but not yet reported upon), the writer refers to the descriptive matter and illustrations contained in the attached Appendixes.

Appendix I — Extra high-tension switching gear and apparatus and typical designs of 110,000, 80,000 and 44,000 volt stations and sub-stations.

Appendix II — Continuity of service. Abstracts from operating reports of high-tension systems.

Appendix III — Steam generating plants or hydro-electric power receiving sub-stations, and local transforming and distributing sub-stations.

Digitized by Google

Digitized by Google

APPENDIX I

EXTRA HIGH-TENSION SWITCHING GEAR AND APPARATUS AND TYPICAL DESIGNS OF STATIONS AND SUB-STATIONS.

A. — The Following Illustrations of Station Plans and Extra High-Tension Apparatus Apply to Westinghouse Electric and Manufacturing Company's Designs and Are Typical of the Estimates in Tables I, II, and III.

110,000 Volt, 60,000 K. W., Hydro-Electric Power Station.

Figs. 1 and 2 show the layout of a proposed station designed for Westinghouse apparatus. Full description of the distinctive features of this design is given in Mr. Hayes' paper before this Congress. The estimates of Tables I, II and III have been made using this typical design as a standard.

Digitized by Google

Digitized by Google

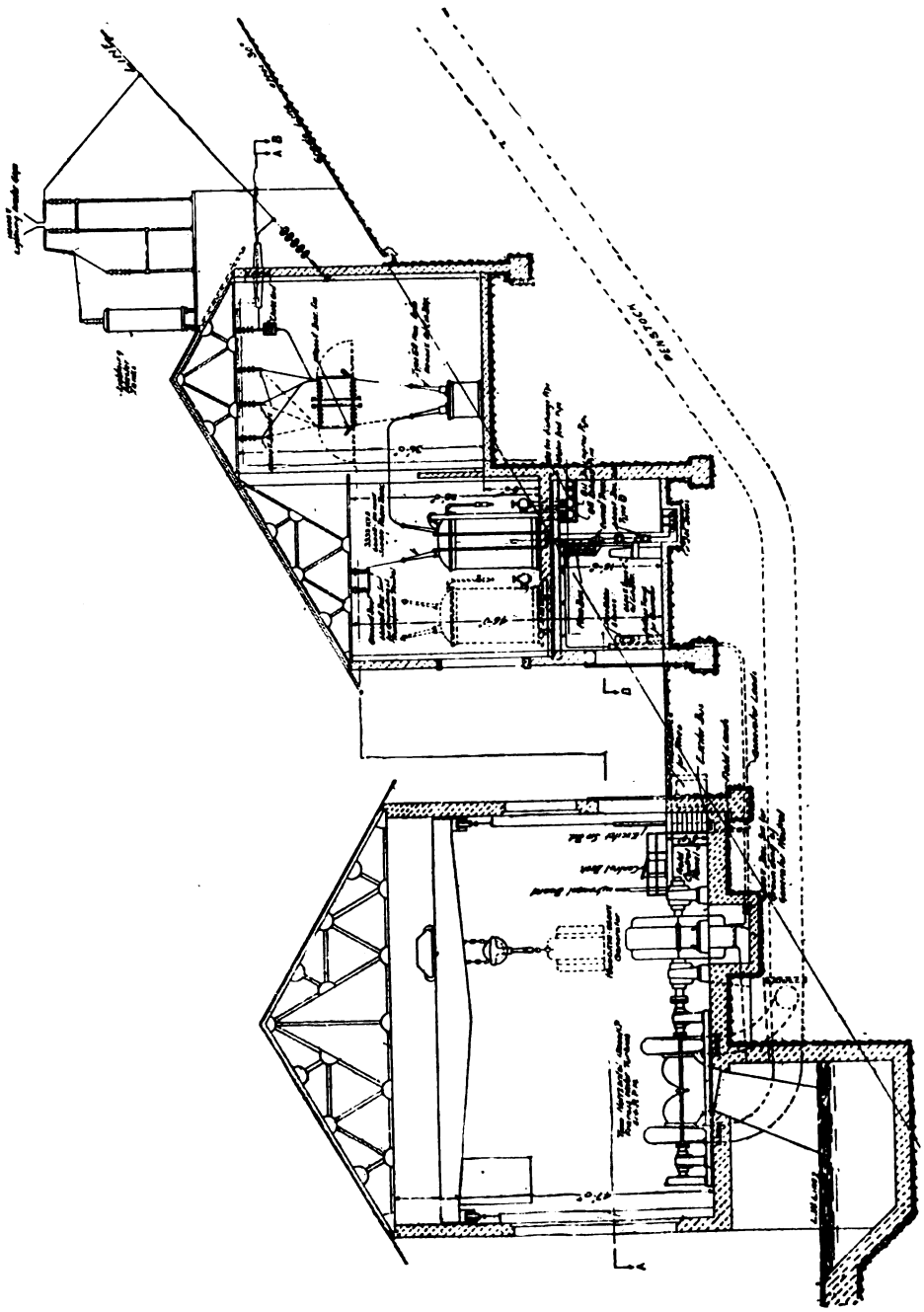


FIG. 1
Sectional View of 60,000 K. V. A. 110,000-Volt Station

Digitized by Google

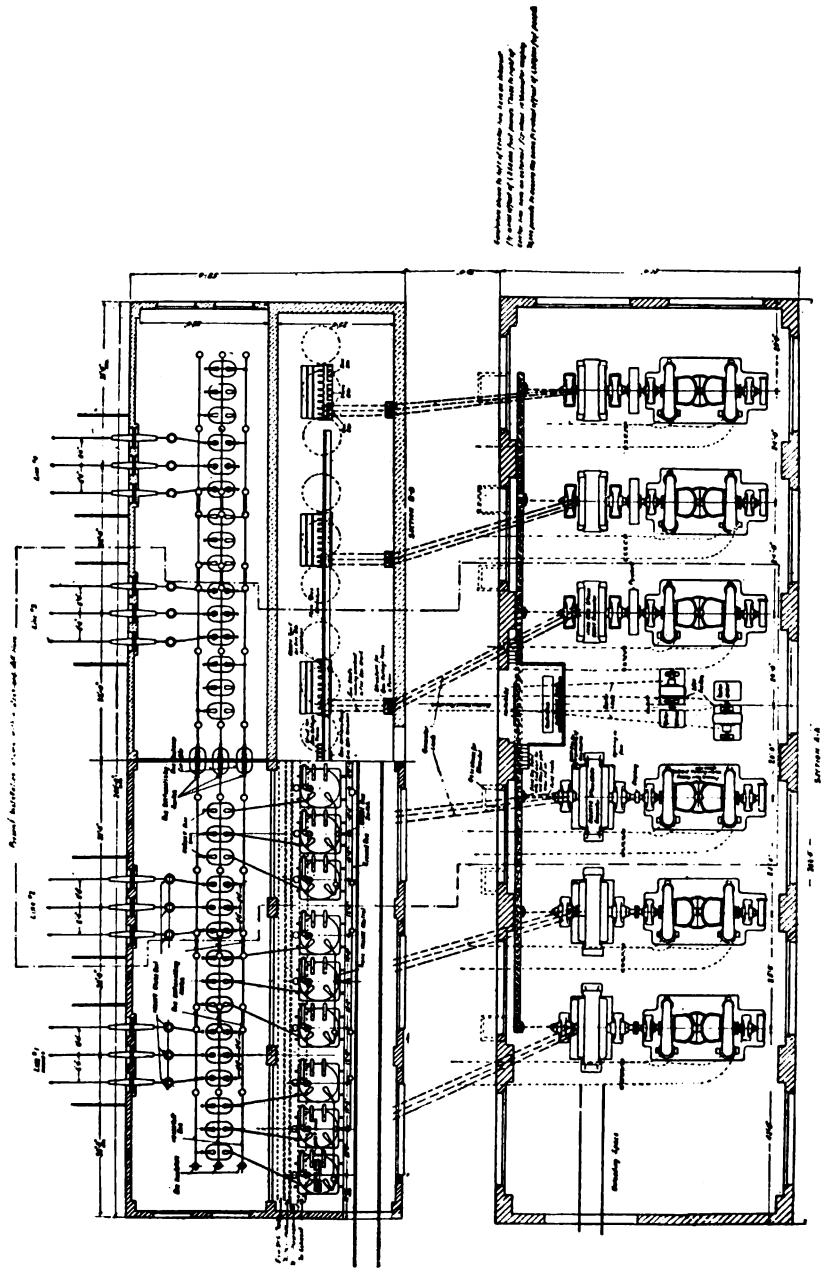


FIG. 2
Plan View of 60,000 K. V. A. 110,000-Volt Station.

Digitized by Google

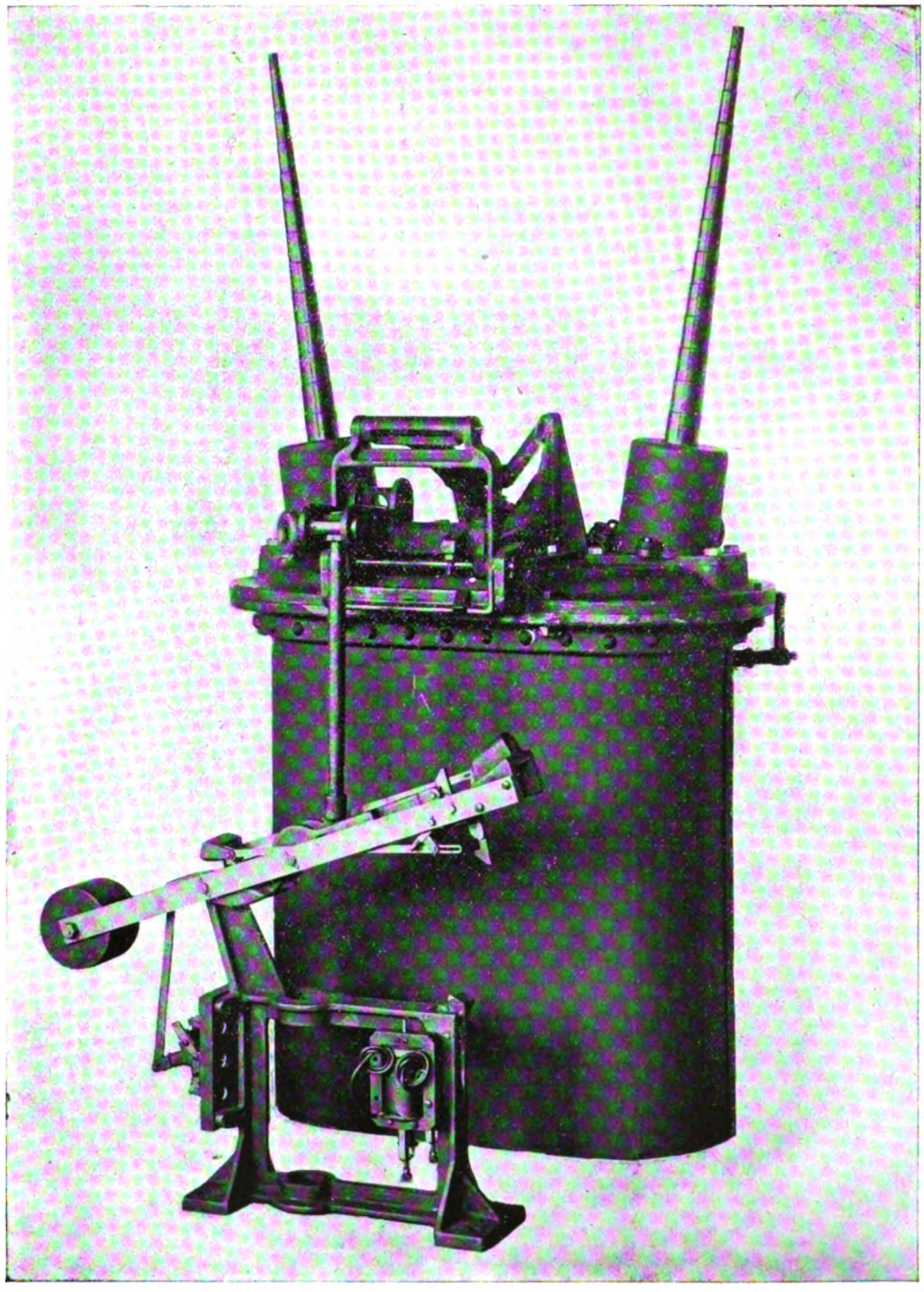


FIG. 3
View of 300 Ampere—44,000 Volt Oil Switch

Digitized by Google

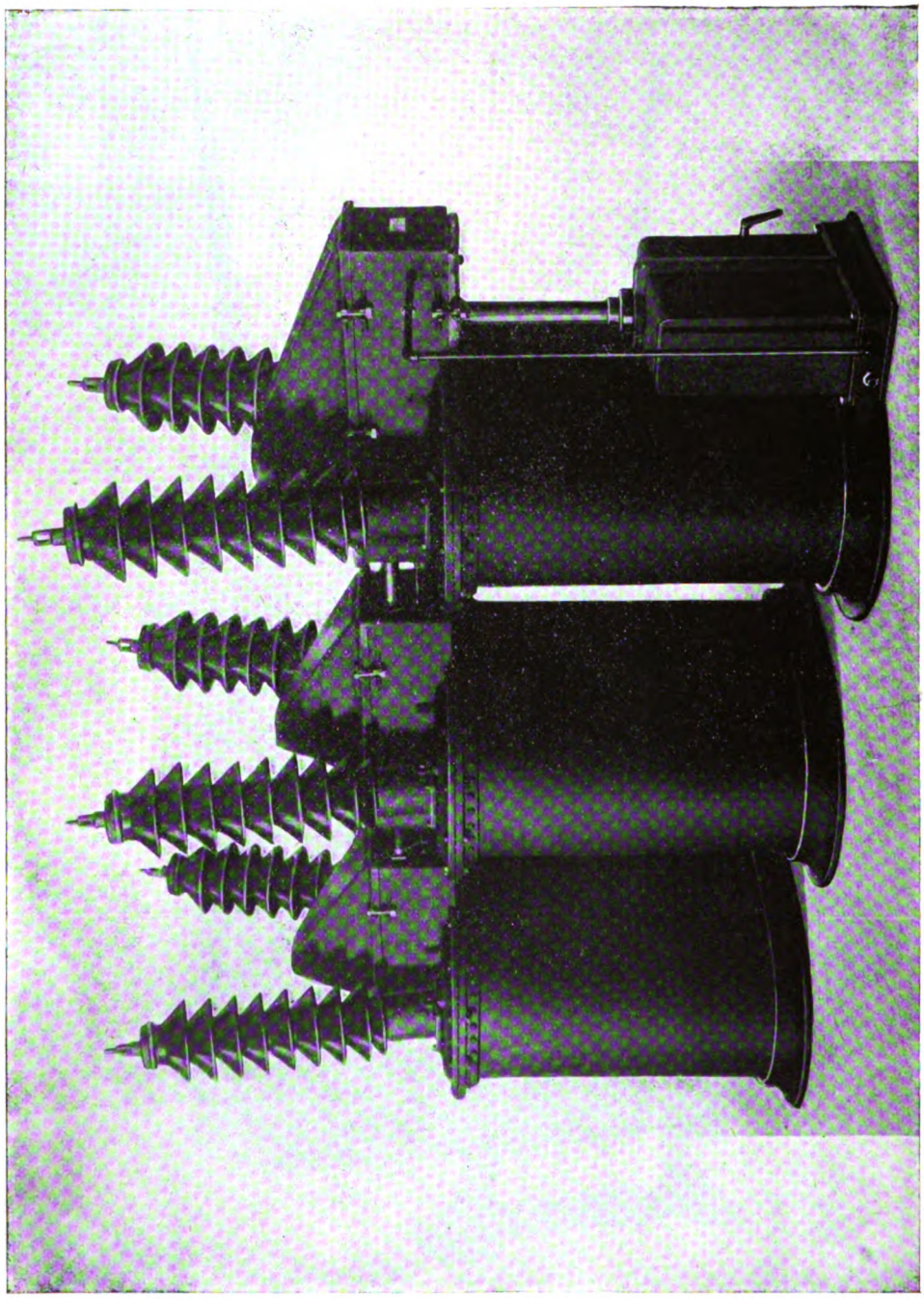


FIG. 4
View of 300 Ampere 100,000 Volt Outdoor Switch

Digitized by Google

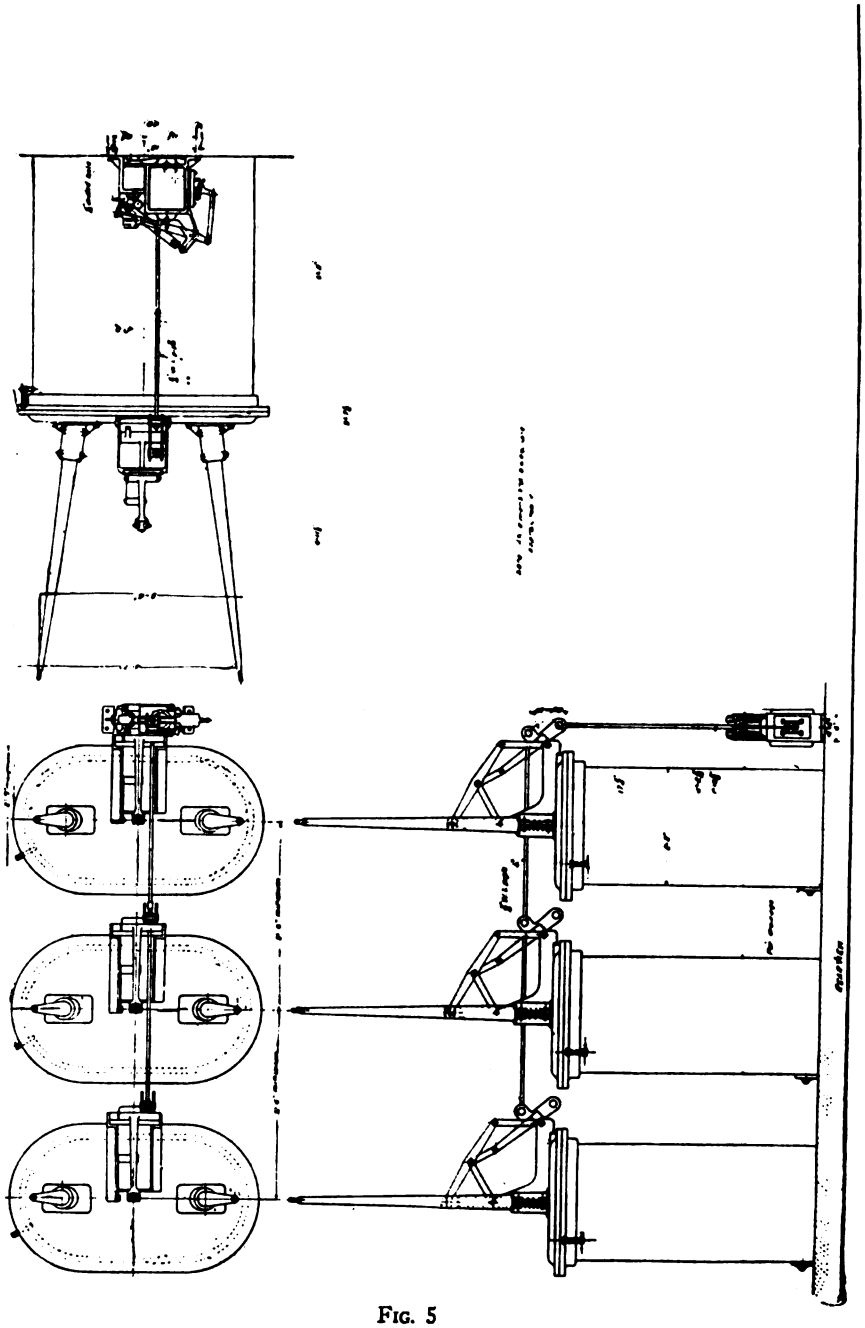


FIG. 5
Outline Dimensions of 88,000-Volt Oil Switches

Digitized by Google

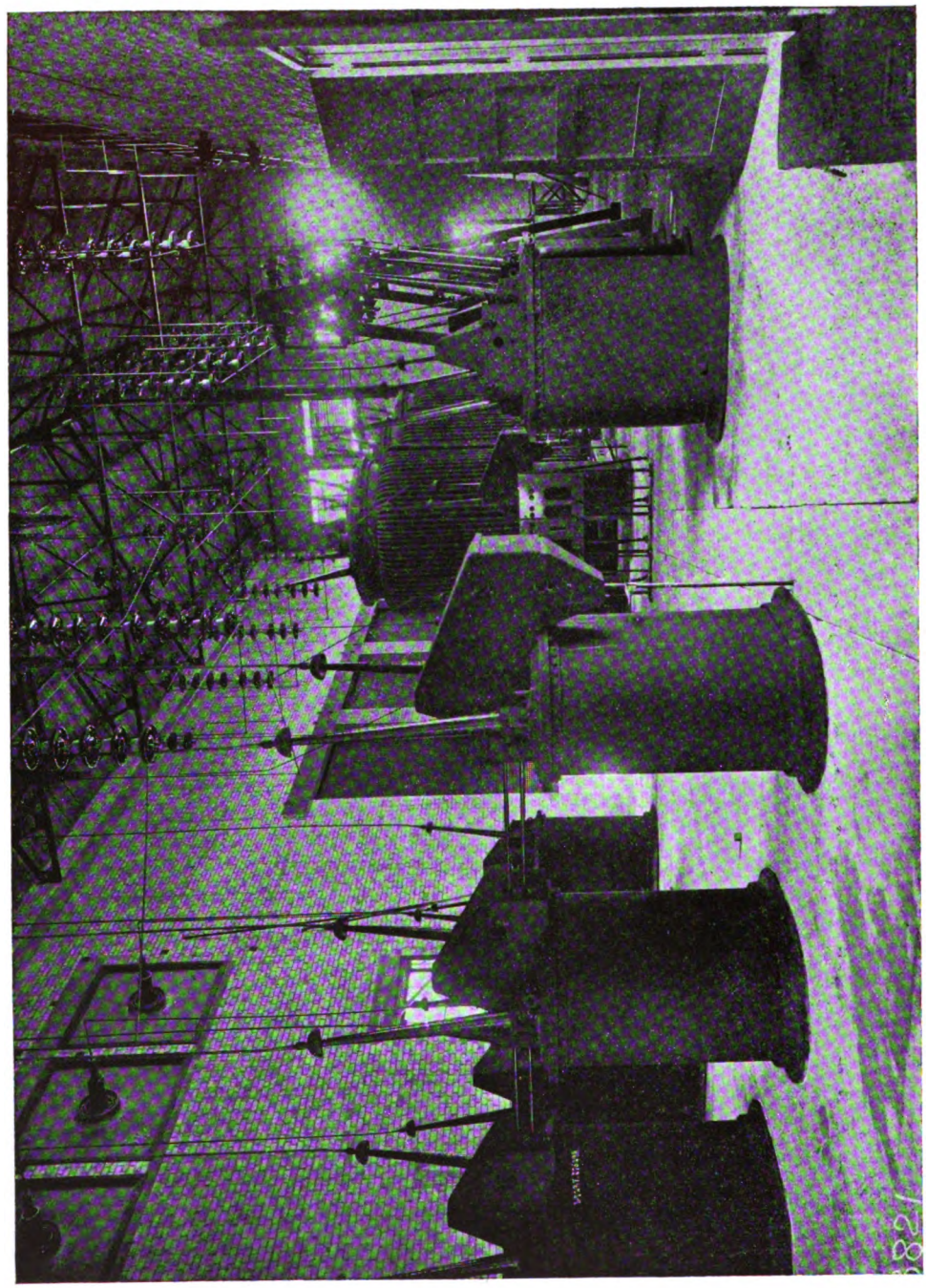


FIG. 6
View of 6,000 K. W.—100,000 Volt Sub-Station (Tying 50,000 and 100,000 Volt Lines)

Digitized by Google

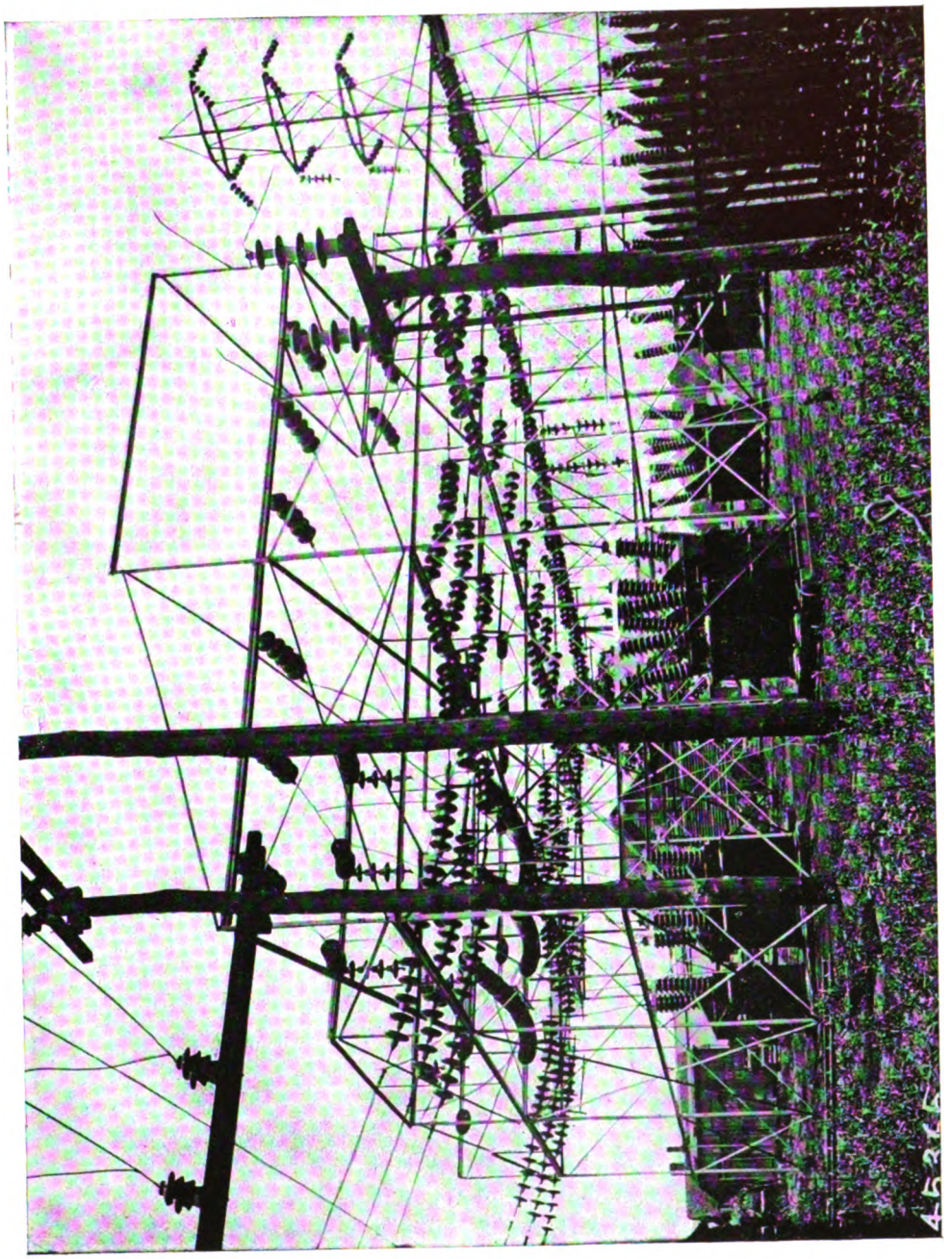


FIG. 7
View of 100,000 Volt Outdoor Switching Station

Digitized by Google

Digitized by Google

B. — The Following Descriptions and Illustrations of Station and Sub-Station Designs and Extra High-Tension Apparatus Apply to General Electric Company's Designs, and Are Typical of the Estimates in Tables IV, V, VI and VII.

(a) 80,000 Volt Hydro-Electric Power Station Having an Initial Capacity of 32,000 K. W. and an Ultimate Capacity of 64,000 K. W.

Photographs 8, 9, 10, 11 and 12 show a recent design somewhat typical of other large stations and of what is considered good modern practice.

All of the apparatus is housed in a single building with the exception of oil storage and filtering devices, which are located in a separate building on the hillside. *While in some cases the transformer and switch house are kept independent of the generator room, experience indicates that the additional expense involved in such a design is not warranted.*

The transformers are located so that they can be rolled out under the main crane and out of the building or to the repair shop, the transformer compartments being separated from the generator room by metal rolling doors and each transformer compartment being drained into the tail race so that should any serious trouble develop which would cause the transformers to leak oil and catch afire, it would not communicate to the generator room.

For controlling the water supply to the transformers and for discharging the oil from any transformer to the storage tanks without entering the transformer compartments, a pipe hallway is provided containing such piping, valves, etc.

The station is laid out so that extensions can be made to both ends, therefore all of the apparatus common to the station is located in the center. In this way the station is really divided into practically two distinct halves.

The switchboard is located some 12 feet above the generator room floor and the gallery extended beyond the crane columns so that a full view of the station is afforded to the switchboard operators. At the same time they are in the center of all of the switching apparatus and can quickly get to any oil switch, arrester, etc., should it be necessary.

Digitized by Google

The low-tension switching room is entirely separated from the high-tension equipment so as to obviate any possibility of getting high potential on the low-tension circuits.

The field rheostats are electrically operated and located adjacent to their respective machines. The position of these rheostats, as will be noted, is such that they will obtain excellent ventilation.

Notwithstanding the high potential used in this station the horn gaps for the electrolytic lightning arresters have been located in the building. This is unusual but was done to reduce the number of line entrance bushings because of the excessive rain storms which occur in the locality where this station would be erected. The horn gaps are located between roof trusses and no wiring located above. Should an excessive arc develop, it might jump to the steel work and trip the oil switch, but in such a case it would be best to have the oil switch open, as it would represent something radically wrong with the arresters or the line.

All of the high-tension wiring would consist of copper tubing, and special attention has been given to the laying out of this wiring and position of insulators to make the latter accessible for cleaning.

As this station would be located in a very warm climate, the air for cooling the generators is taken from the tail race side of the building where it is subject to a spray from the impulse water wheels. To remove most of the water before the air enters the generators a vapor screen or water separator is shown in the air duct.

The arrangement of switching gear is such that the connections are as straight as possible. This is essential on high-tension work because of the large clearances required between conductors and ground. All conductors are supported on insulators with the exception of the cables from the generators to the oil switches which necessarily have to be carried in ducts. The object is to avoid the use of any lead cable in the station where not absolutely necessary. On the low tension work all of the connections are separated with barriers and protected by doors. The low tension bus (this design may represent any voltage from 2,300 to 13,000) is carried in compartments which form a part of the floor because of the infrequent spacing of the oil switches.

Exhaust fans are provided for renewing the air in the generator room and in the battery rooms.

Digitized by Google

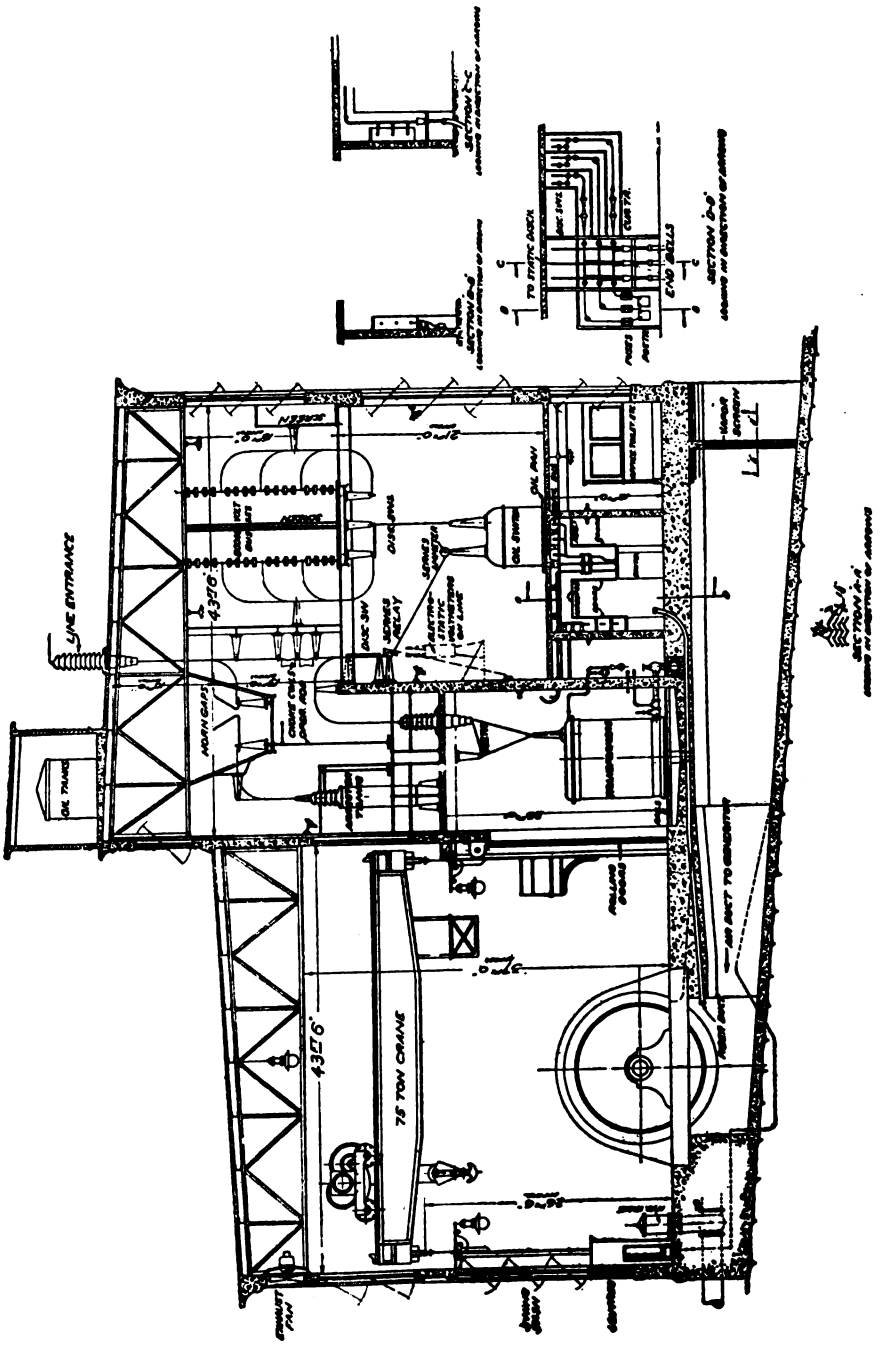


FIG. 8
Sectional View 32,000-64,000 K. V. A. 80,000-Volt Station

Digitized by Google

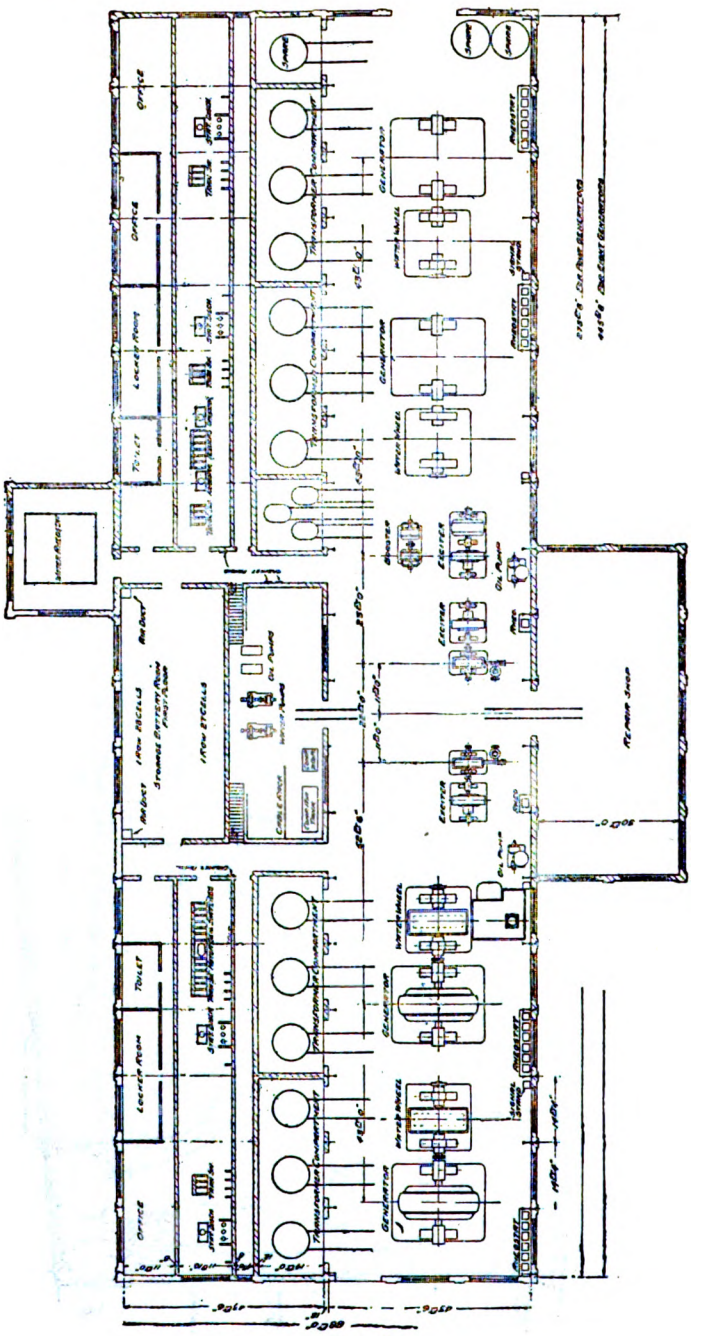


FIG. 9
Plan View—Main Floor

Digitized by Google

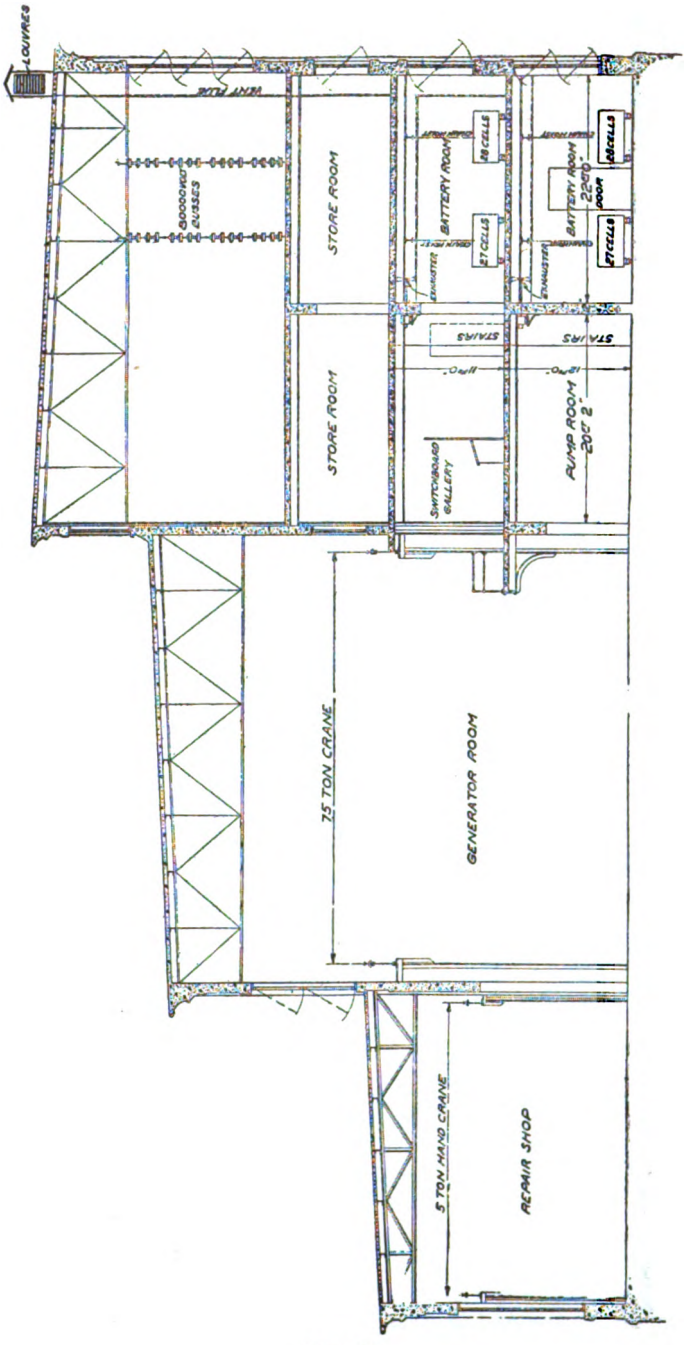


FIG. 10
Sectional View at Center of Building

Digitized by Google

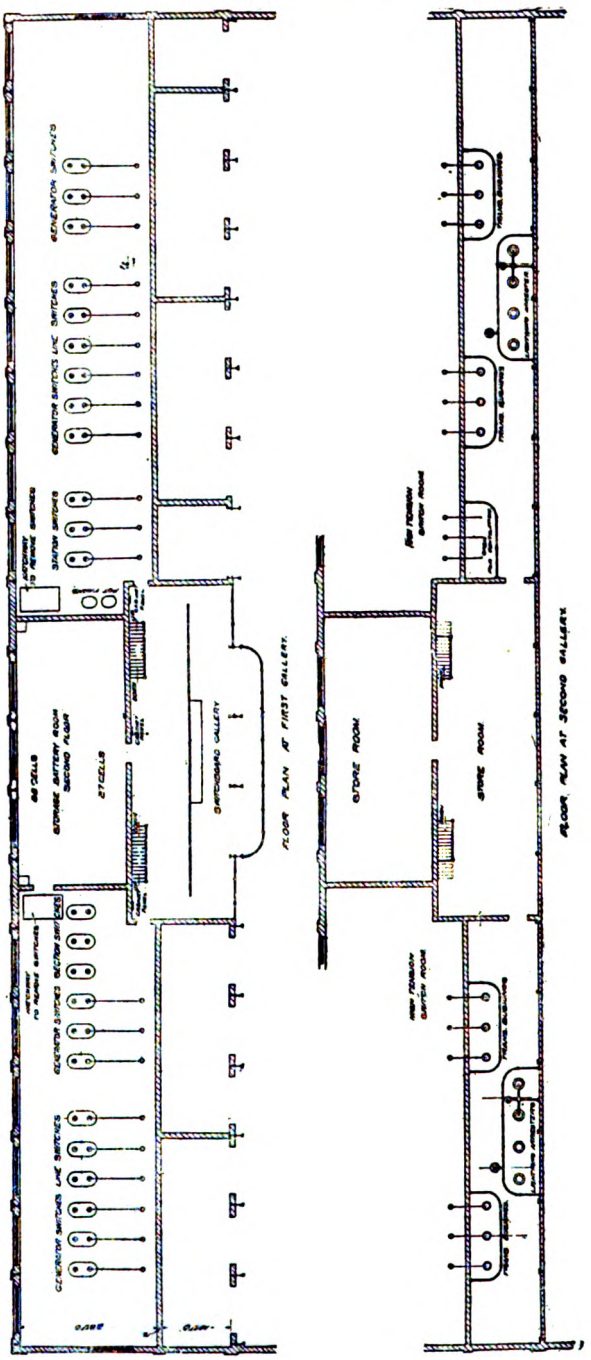


FIG. 11
Plan View of Galleries

Digitized by Google

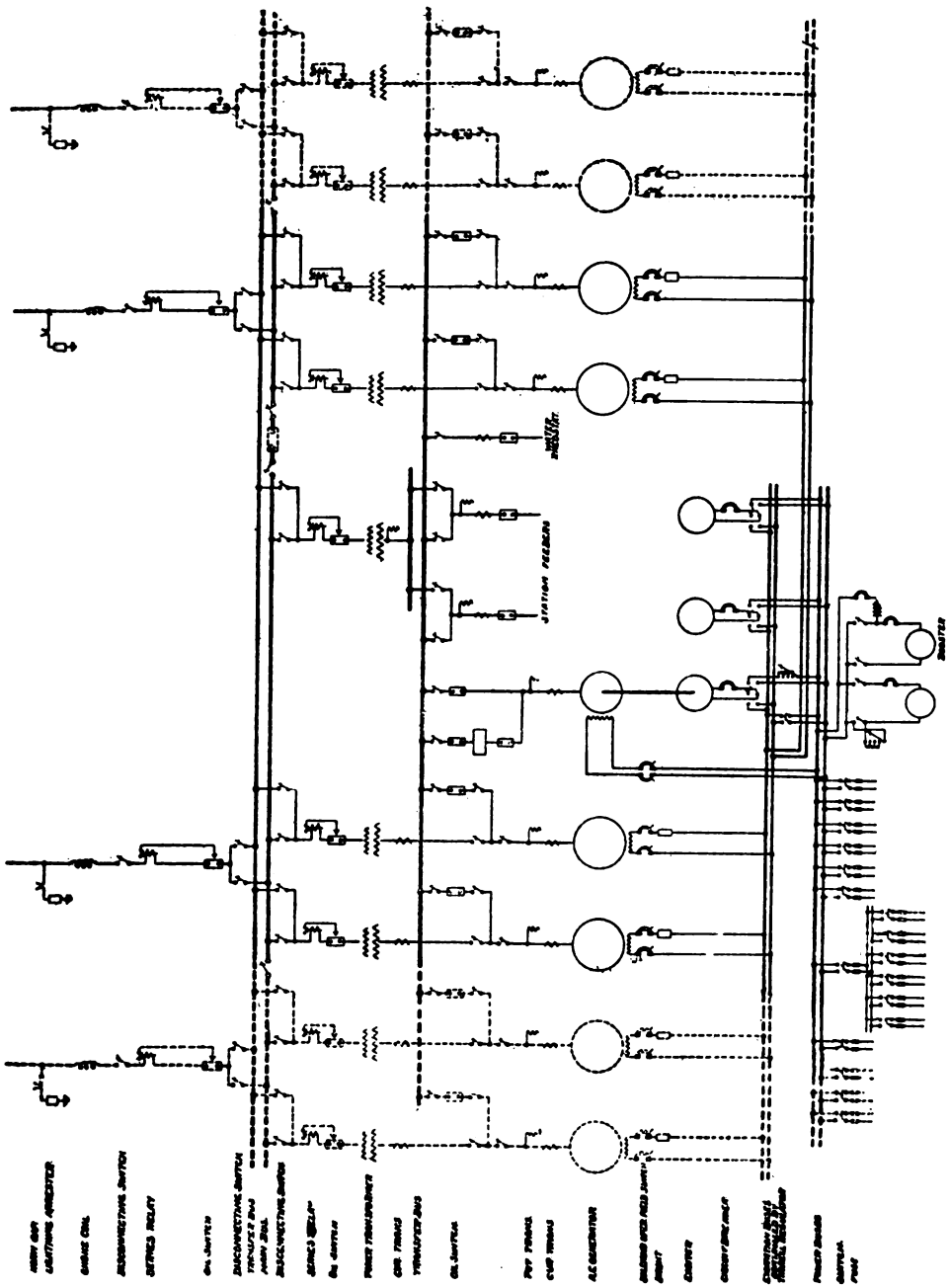


FIG. 12
Diagram of Connections

Digitized by Google

(b) 100,000 Volt, 7,500 K. W. Transformer Station Indoor Type.

Photographs 13 and 14 show a transformer station designed for taking power from a water power station some distance away and transforming it to 13,200 volts for general municipal use. This station, together with ten others of similar design and purpose are located in a comparatively cold climate.

The 110,000 volt line forms a loop through all of these stations thus being equivalent in a measure to duplicate transmission lines. Oil switches are provided on both the incoming and outgoing lines so that either may be cut out and the station fed from the opposite direction.

The building, while necessarily large, has been made as simple as possible by the use of columns for supporting the roof. The transformers are partially isolated from the high-tension switching room and each bank of transformers is separated from the adjacent bank by a brik wall. In many cases each transformer is housed in a separate compartment, but in general it is only considered necessary to isolate each bank of transformers. In this particular case the walls separating transformers from the high tension room have not been carried entirely to the ceiling as it was desired to avoid the use of so many high tension entrance bushings.

The station is provided with oil drying and filtering apparatus in a basement, not shown on the drawing, and repair shop, on the main floor, provided with a crane making it possible to remove the cores of the transformers for inspection or repairs, a convenience which is very desirable in stations of any importance.

One of the very interesting features of this station is the elimination of all corona on the high-tension conductors and devices. This was accomplished by making all of the connections of 1-inch copper tubing and joining the sections together by means of inside copper sleeves soldered to the main tubing resulting in a perfectly smooth connection from terminal to terminal. Special terminals were also provided on all devices so that no sharp projections of any kind which would act as discharge points existed. The series relays, the caps on the high-tension insulators, and other similar parts were protected by

Digitized by Google

metal sheaths to eliminate corona. The disconnecting switches are of special design, the blades being made of copper tubing.

The horn gaps used in connection with the high-tension lightning arresters are mounted outside of the building on a steel tower, which also acts as a strain tower for the incoming line. The arrester tanks which are of the aluminum cell type are located in the building where they are protected from the sun in summer and the extreme cold in winter. All of the oil switches are electrically operated and controlled from the main switchboard located on a gallery at one end of the building. Alarm bells used in connection with the lightning arresters and oil switches announce to the switchboard attendant the operation of either device. The object of these alarms on the lightning arresters is to call the attendant's attention to a continued discharge.

Roof entrance bushings for the 110,000 volt lines consist of built up sections of porcelain, the interior being protected by concentric insulating sleeves between the conductor and the porcelain, and filled throughout with a viscous oil insulating compound.

The ground connections for the lightning arresters are constructed of galvanized iron rods driven in the ground some six or eight feet around the entire building, the spacing between rods varying according to the position of the arresters. In this station some 25 of these rods were used. These rods were all connected to a copper ribbon secured to the exterior of the building foundation below the ground level. In this way it forms a complete loop.

Digitized by Google

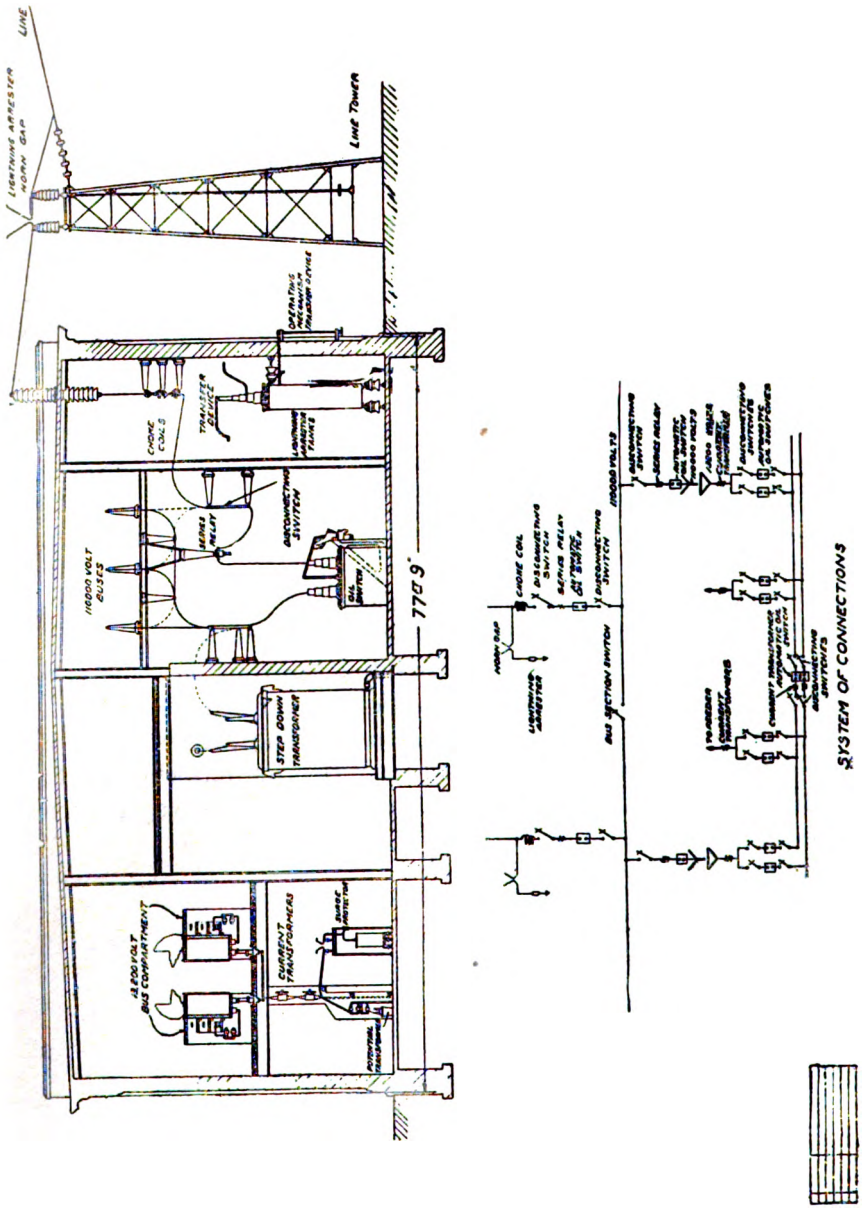


FIG. 13
Sectional View 7,500 K. V. A. 110,000-Volt Transformer Sub-Station

Digitized by Google

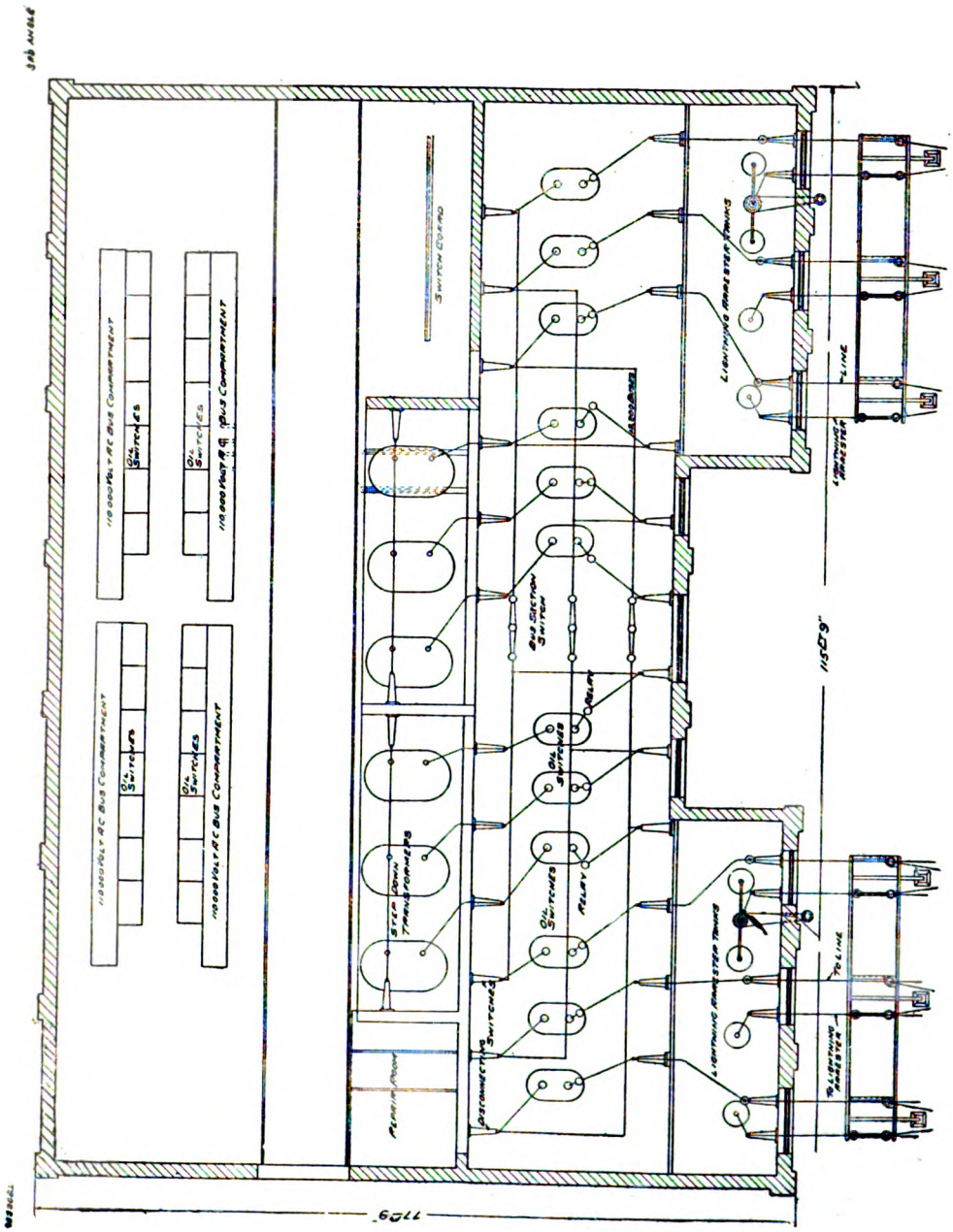


FIG. 14
Plan View

Digitized by Google

(c) 110,000 Volt to 60,000 Volt Transformer and Switching Station — Outdoor Type.

Photographs 15 and 16 show a design of a switching and transformer station intended to tie two large water power systems together so that either could purchase power from the other, also to feed through transformers stepping down to 60,000 volts some 6,000 K. W. This station while it will not be constructed exactly in accordance with these plans will be built along their general lines and is located in a climate where there is no snow, consequently no severe cold weather to contend with.

There are two complete sets of 110,000 volt buses and two sets of 60,000 volt buses which permit of numerous switching combinations.

All of the apparatus is mounted out of doors with the exception of the oil switches. The house for these switches can and will be made simpler than that shown on the drawing by doing away with all windows and line entrances. The side walls extend only to within 7 feet of the ground and some 5 or 6 feet from the eaves of the building, thus only providing protection to the switches against a driving rain. All of the oil switches are hand operated, and while the territory for a man to traverse is somewhat large, the switching will only be done infrequently, all synchronizing being taken care of at other points. The switches, however, will be automatic so as to isolate any trouble on the lines as far as possible.

The high-tension buses where located out of doors will be liberally protected with ground wires or screen. In this way the lightning arresters will not only help to protect the line, but will also protect the other apparatus which ordinarily would be located in the station.

There would be an operator's shed located at some central point and designed to give the operator the best view possible of the interior of the switch house and all of the connections outside. A repair shop for handling transformers is also included.

Digitized by Google

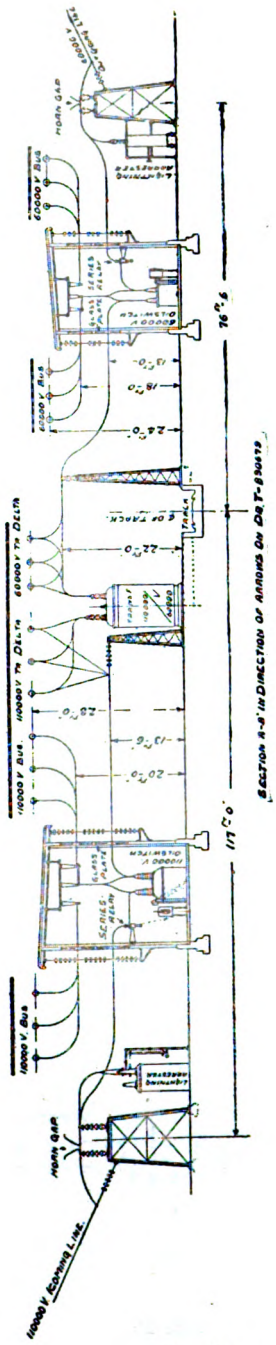


FIG. 15

Sectional View of 110,000-60,000-Volt Outdoor Switching and Transformer Sub-Station

Digitized by Google

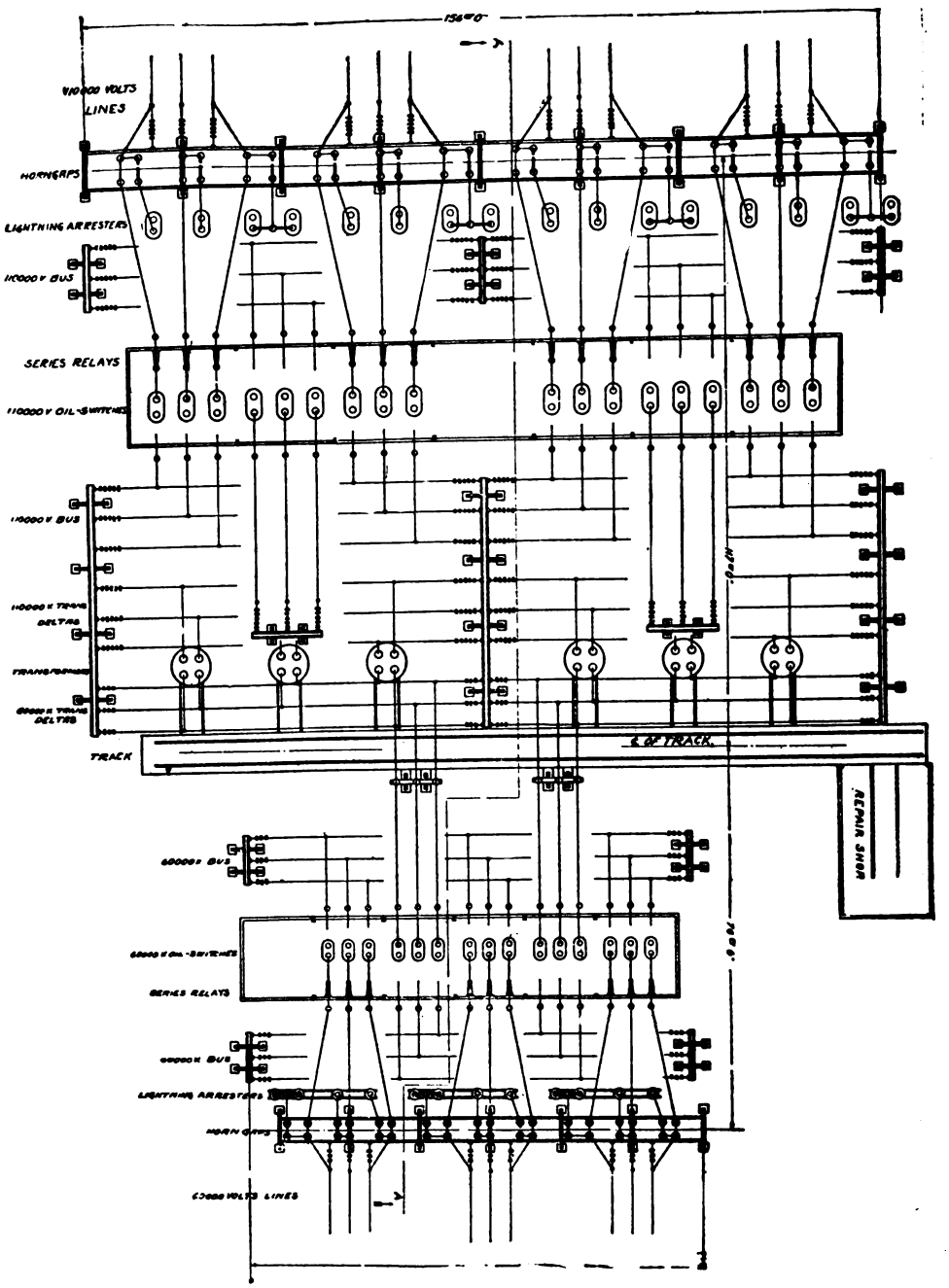


FIG. 16
Plan View

Digitized by Google

(d) 110,000 Volt to 60,000 Volt Transformer and Switching Station — Outdoor Type.

Photographs 17 and 18 show an outdoor switching station similar to photographs 15 and 16 with the exception that the 110,000 volt switching equipment has been simplified and it does not represent as flexible an equipment. Aside from the interesting features described in connection with the latter drawings, it will be noted that a disconnecting switch especially designed for out of door service is used. Three poles of this switch are operated simultaneously by a gear mechanism and horn gaps are provided on each pole at the opening points to help rupture any arc that might be formed and carry it away from the contacts. This switch can be used for breaking line capacity and transformer magnetizing current and might be used in case of an emergency to break energy current.

Digitized by Google

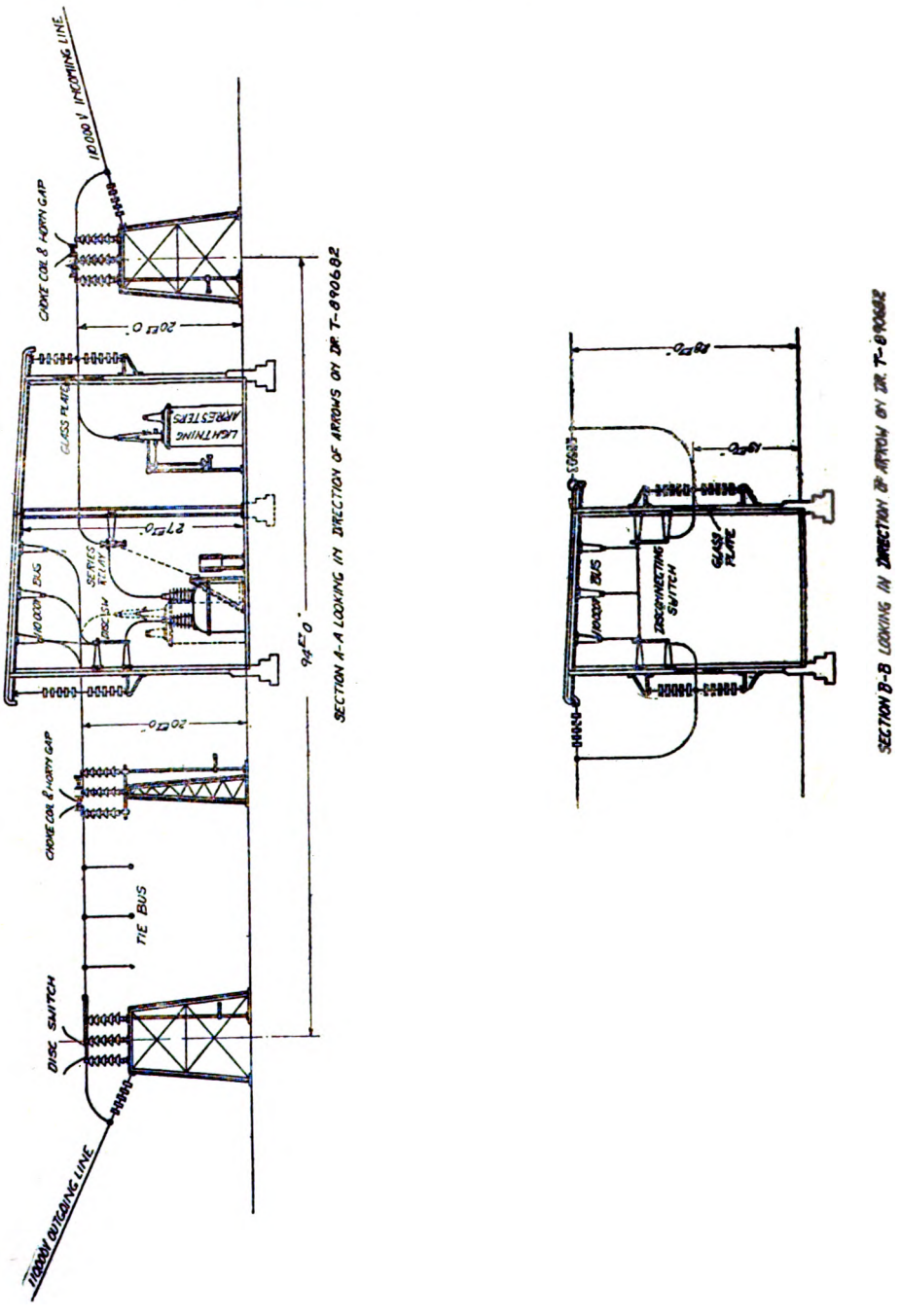


FIG. 17
Sectional View of Simplified Design for Sub-Station of Fig. 15.

Digitized by Google

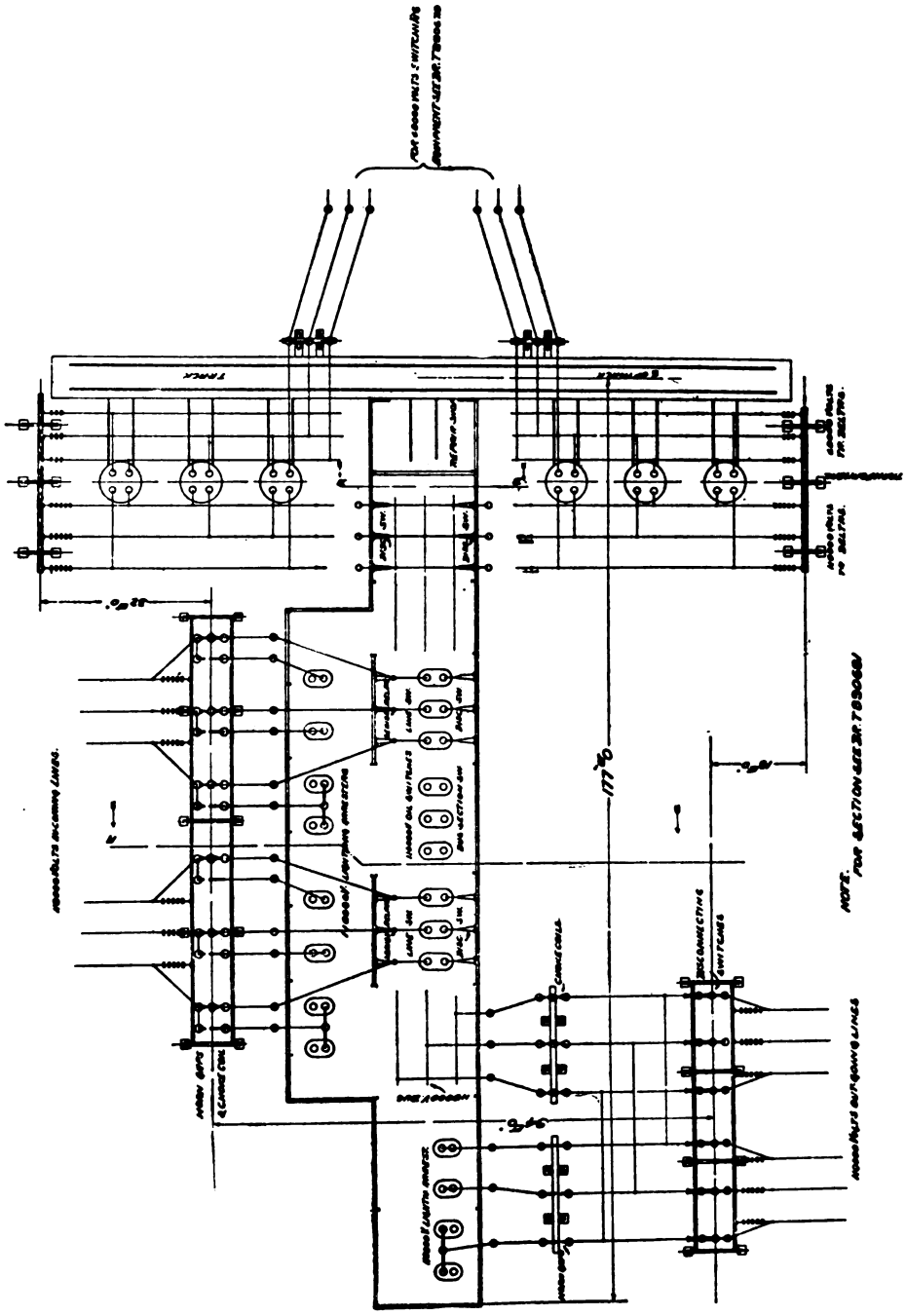


FIG. 18
Plan View

Digitized by Google

C. — High-Tension and Extra High-Tension Apparatus of General Electric Company's Design.

The following illustrations give characteristic designs of transformers, switches, lightning arresters and auxiliary apparatus.

The writer omits detail descriptions, but calls attention to Fig. 31 showing the cross section of a 110,000 volt oil switch bushing, and Fig. 32 giving the external characteristics of bushings from 22,000 to 110,000 volts.

The type of these bushings consists of a shell made up of compound rings and fibre discs which project beyond the compound rings to form a break up for the surface of the insulator. The inside of the shell is provided with concentric tubes of insulating material which act as break up insulation and increase the break down voltage. The space between the tubes is filled with an insulating compound. At the end of the upper half of the insulator is placed a porcelain shell which provides an expansion chamber for the compound sufficient to allow for variations in atmospheric temperature. A porcelain shell is also placed at the lower end of the insulator and the contacts are arranged in such a manner that the bell-shaped part of the insulator forces the oil into the arc when the switch opens. A metal corona shield is placed below the porcelain in such a way as to practically surround the end of the switch blade, and contact fingers, and in this manner cut down the corona and static discharge from sharp points on these parts. The compound shell is built up on a metal flange shown at the center, this flange being grounded. The conductor through the bushing is in the form of a tube of sufficient dimensions to prevent corona or static discharge. The insulator is so proportioned that it will arc over before breaking down, and arc over occurs at a little more than three times normal voltage rating.

Digitized by Google

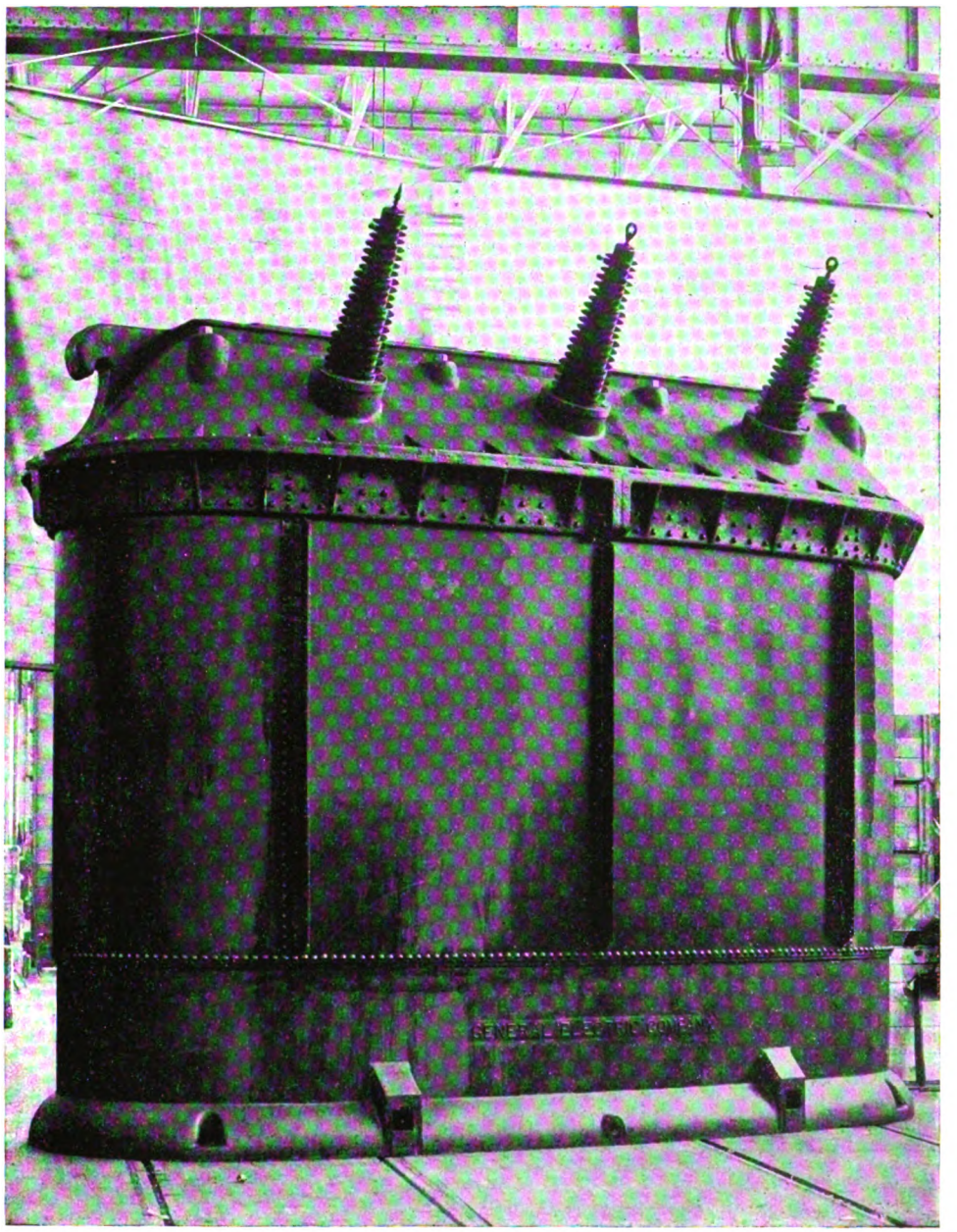


FIG. 19
5,000 K. V. A.—100,000 Volt—Three-Phase Transformer

Digitized by Google

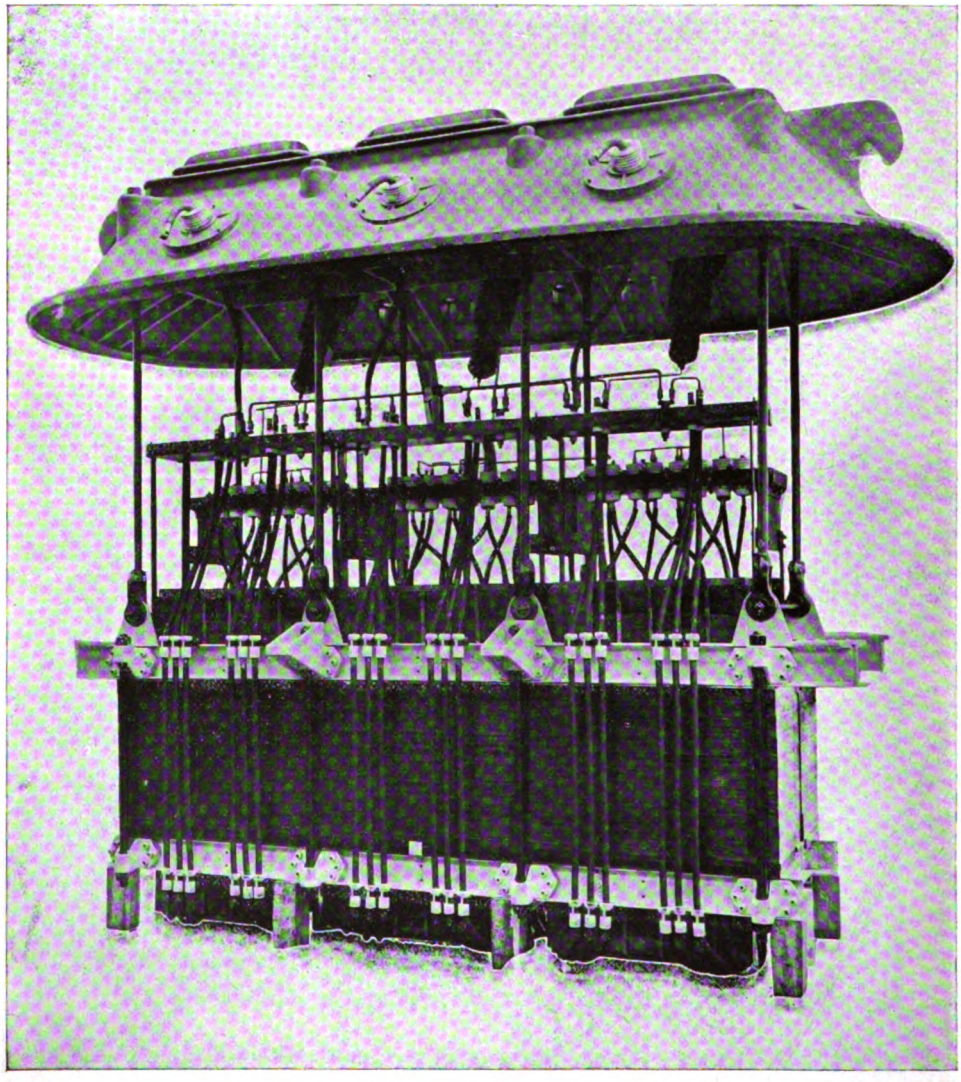


FIG. 20
10,000 K. V. A.—100,000 Volt—Three Phase Transformer—Case Removed

Digitized by Google

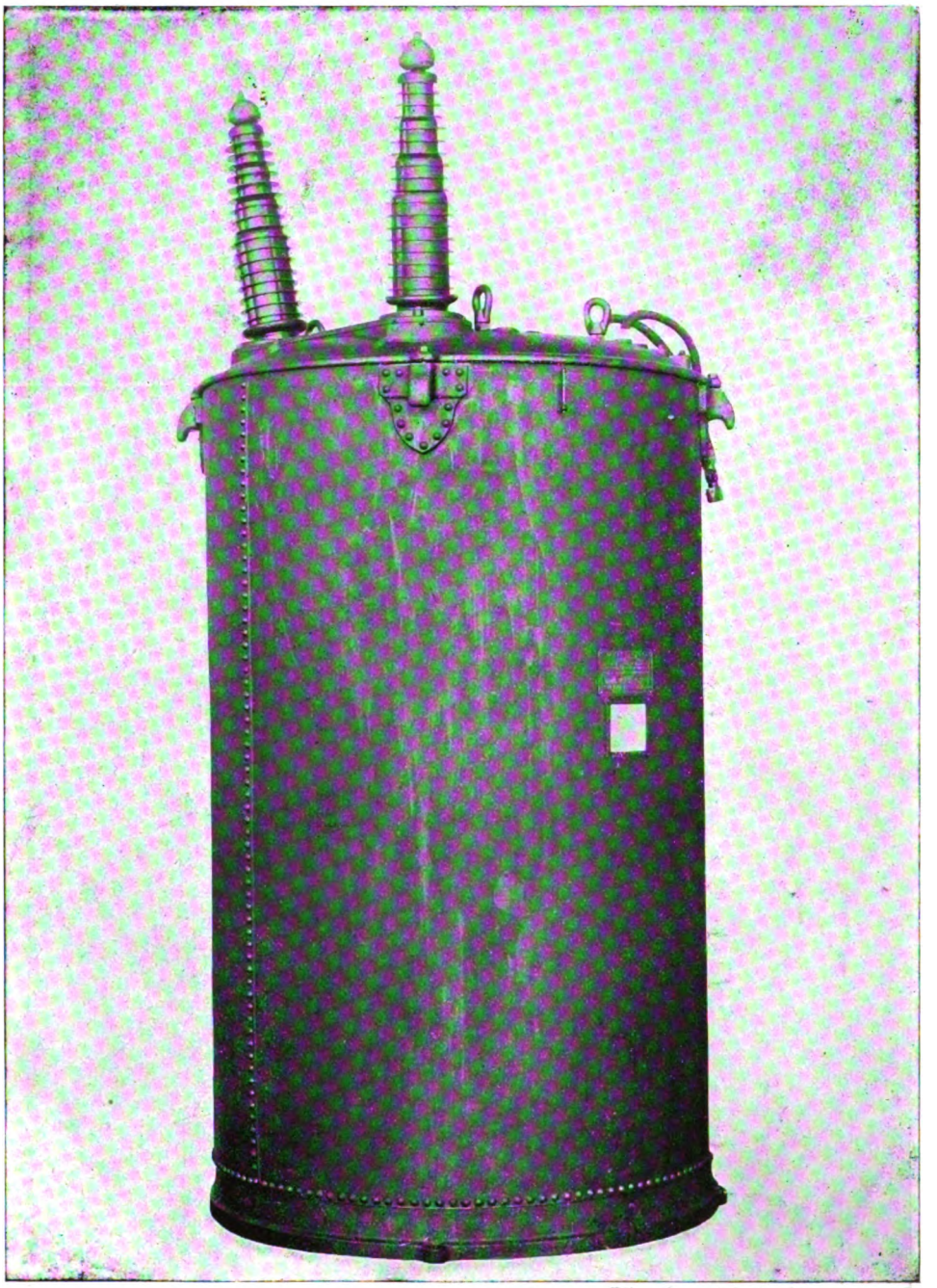


FIG. 21
3,000 K. V. A.—88,000 Volt Single Phase Transformer

Digitized by Google

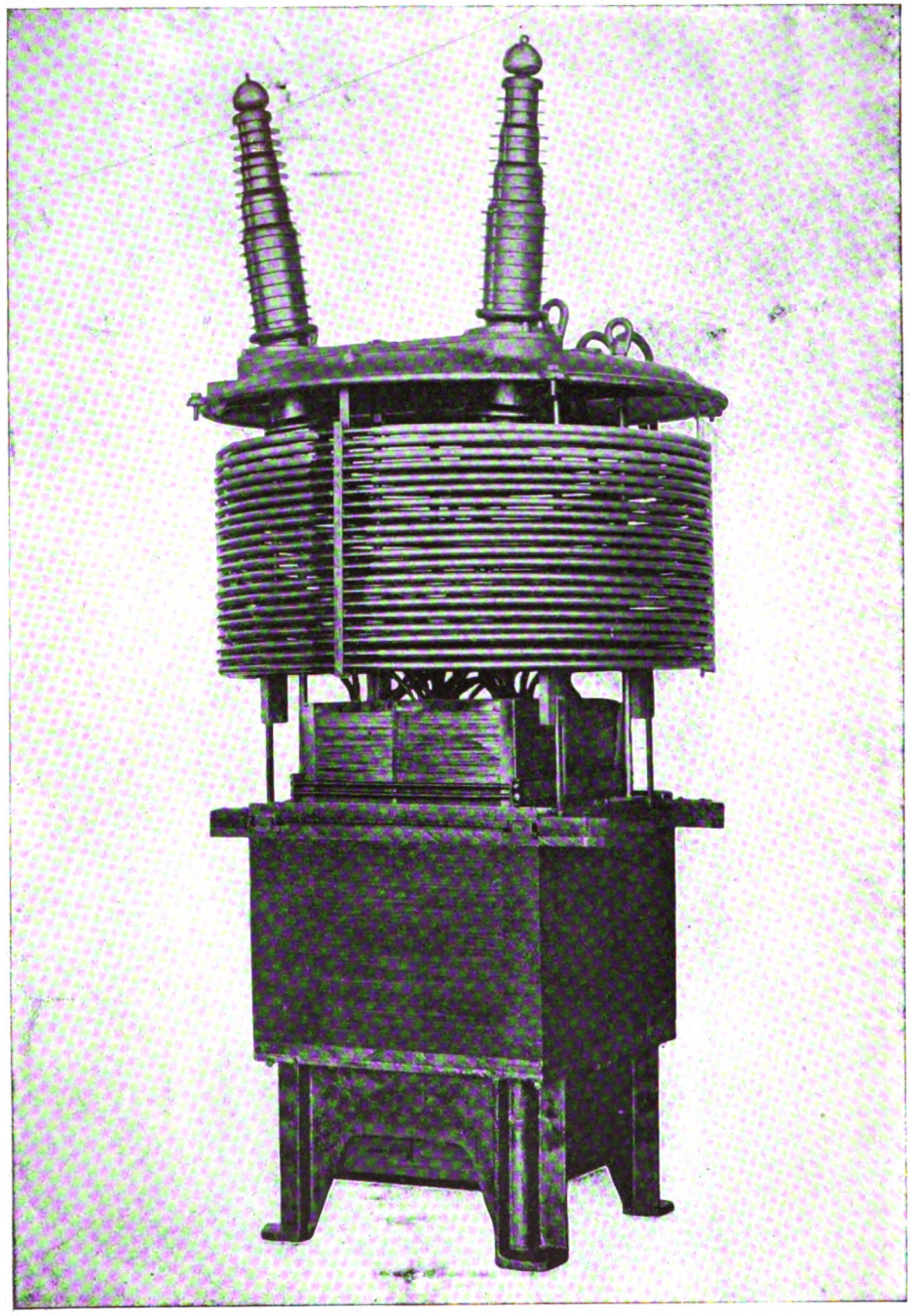


FIG. 22
View of Fig. 21—Case Removed

Digitized by Google

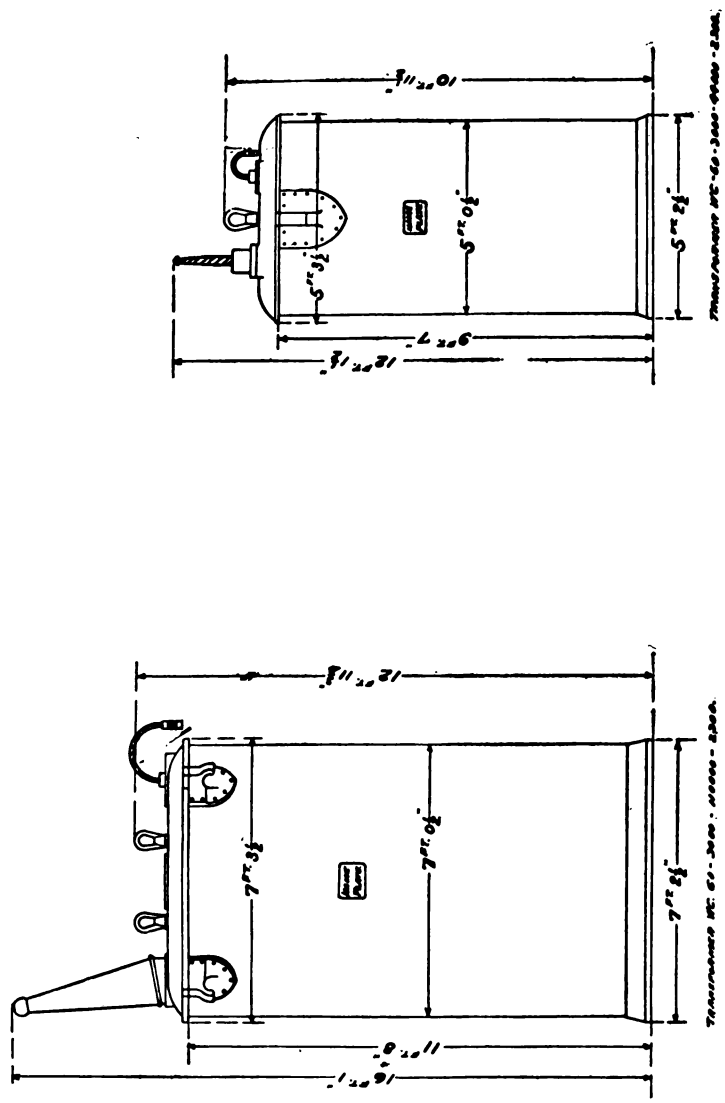


FIG. 23
Comparative Dimensions of 44,000 and 110,000-Volt, 3,000 K. V. A. Transformers

Digitized by Google

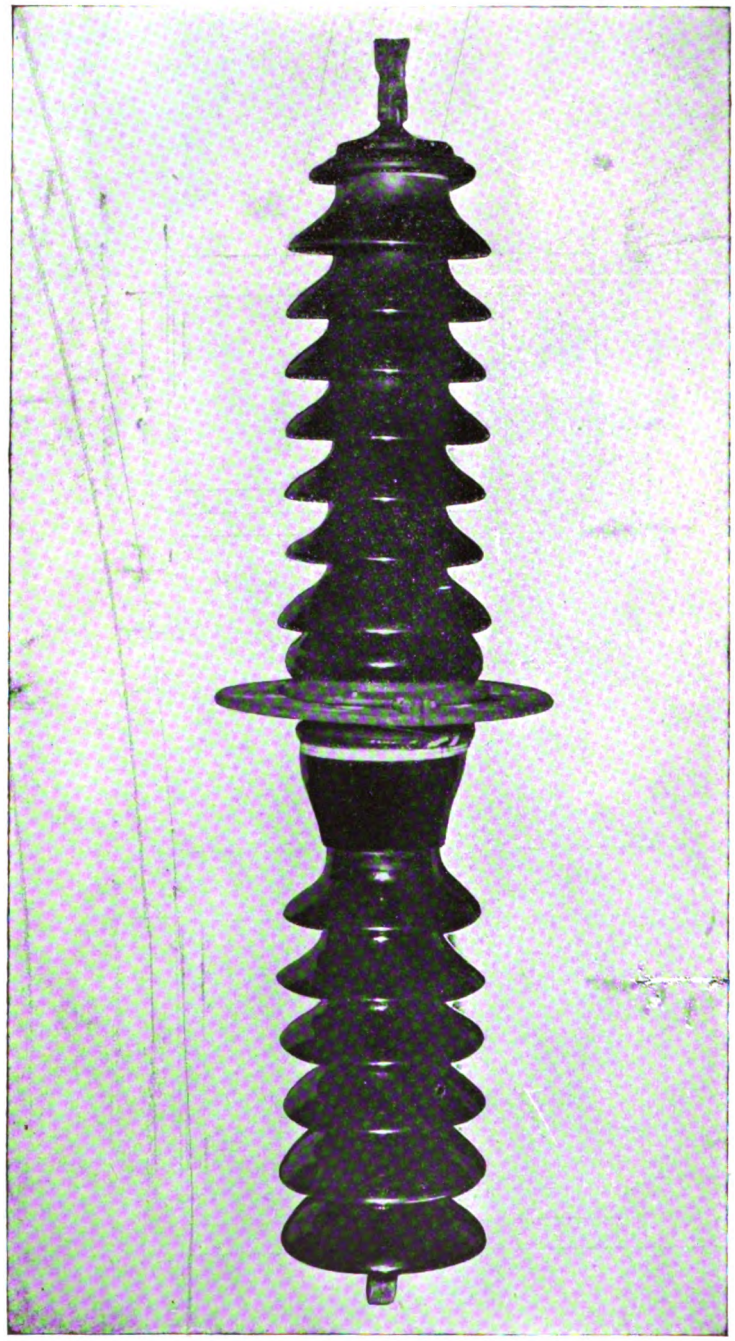


FIG. 24
View of 110,000 Volt Entrance Bushing

Digitized by Google

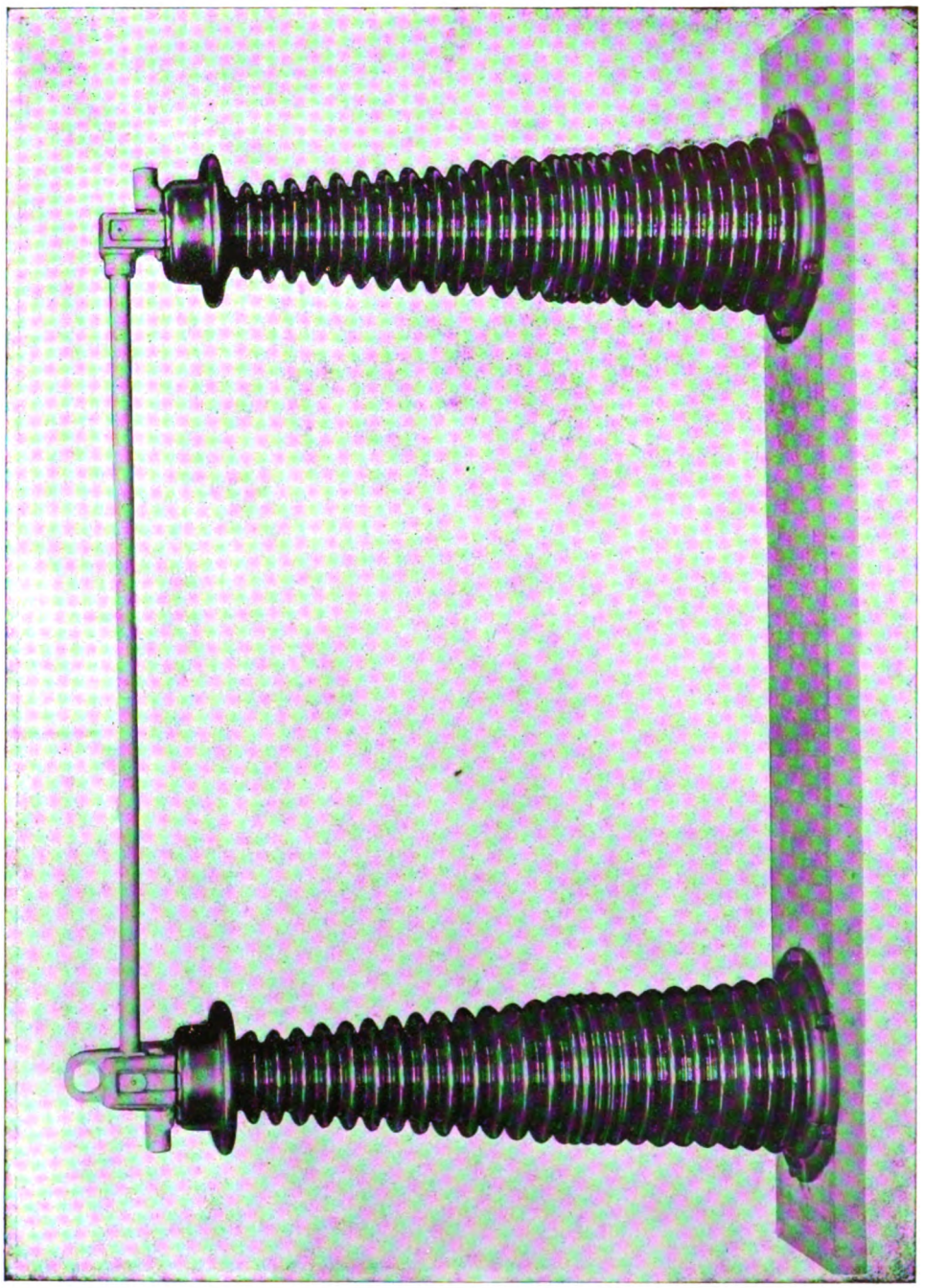


FIG. 25
View of 110,000 Volt Disconnective Switch

Digitized by Google

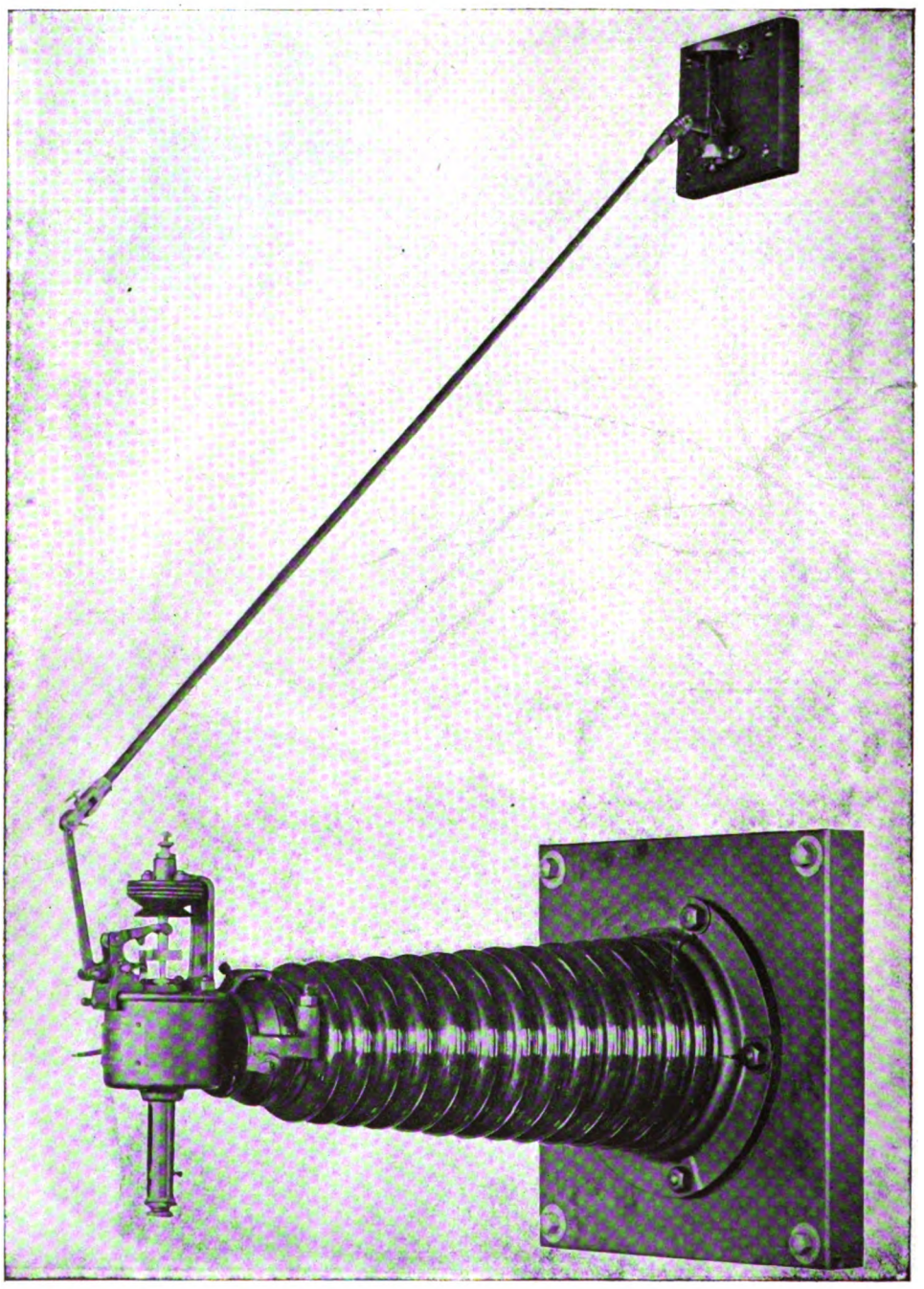


FIG. 26
High Potential Series Relay Mounted on Post Insulator

Digitized by Google

FIG. 27
Ammeter Mounted on Post Insulator for Use in Series with High Voltage Circuits.

Digitized by Google

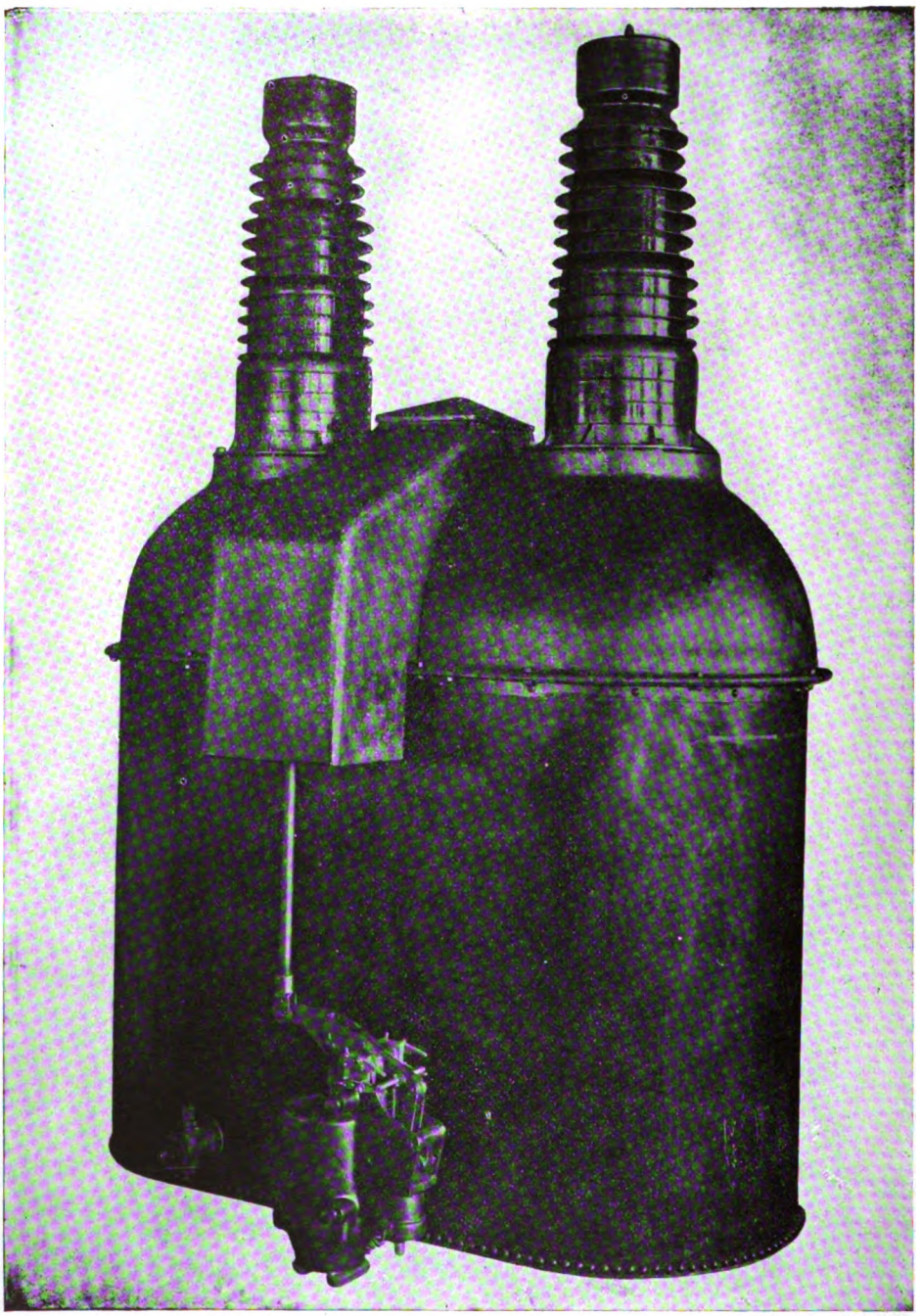


FIG. 28
110,000 Volt—100 Ampere Solenoid Operated Oil Switch

Digitized by Google

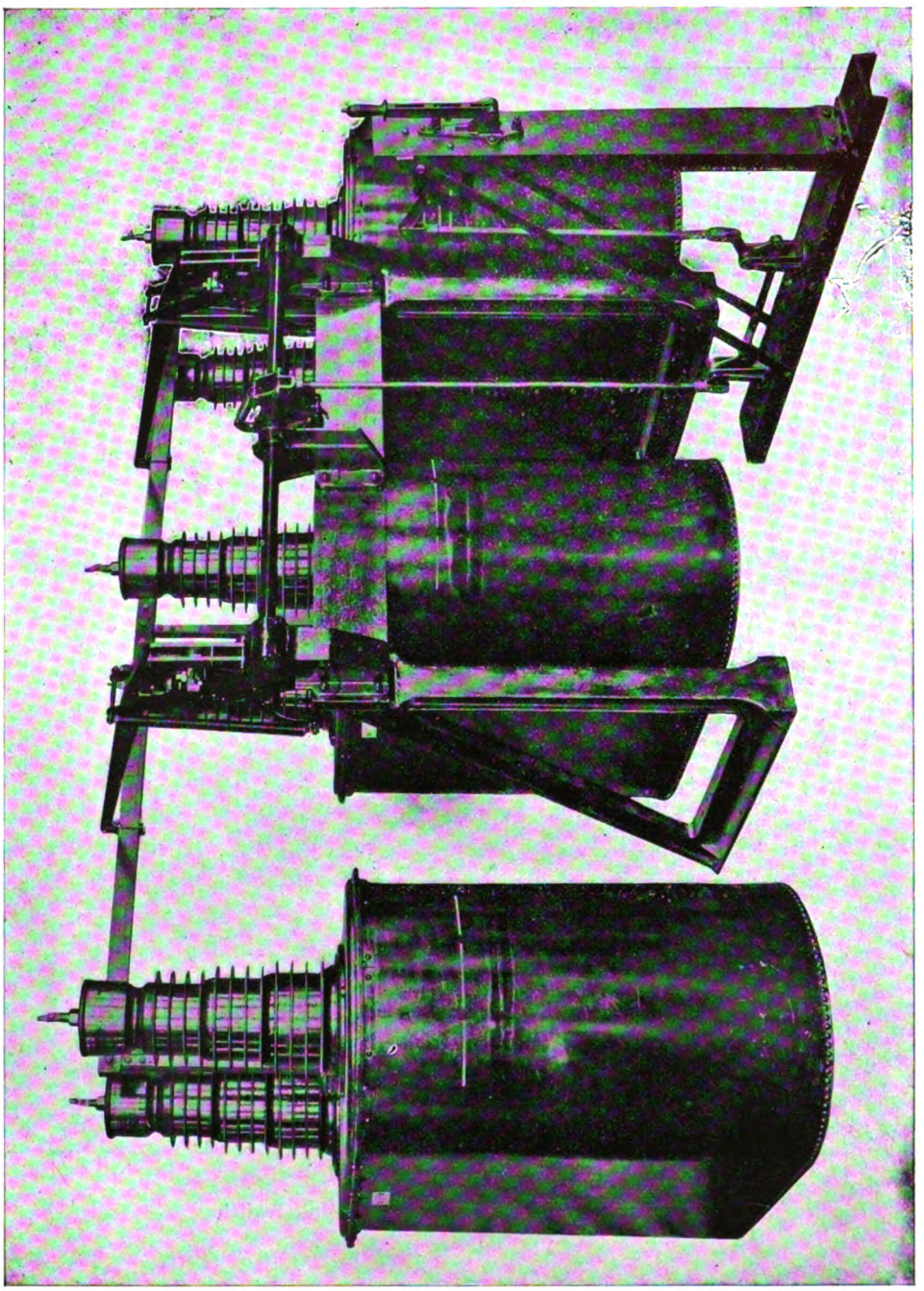


FIG. 29
110,000 Volt—100 Ampere Oil Switch—Hand Operated

Digitized by Google

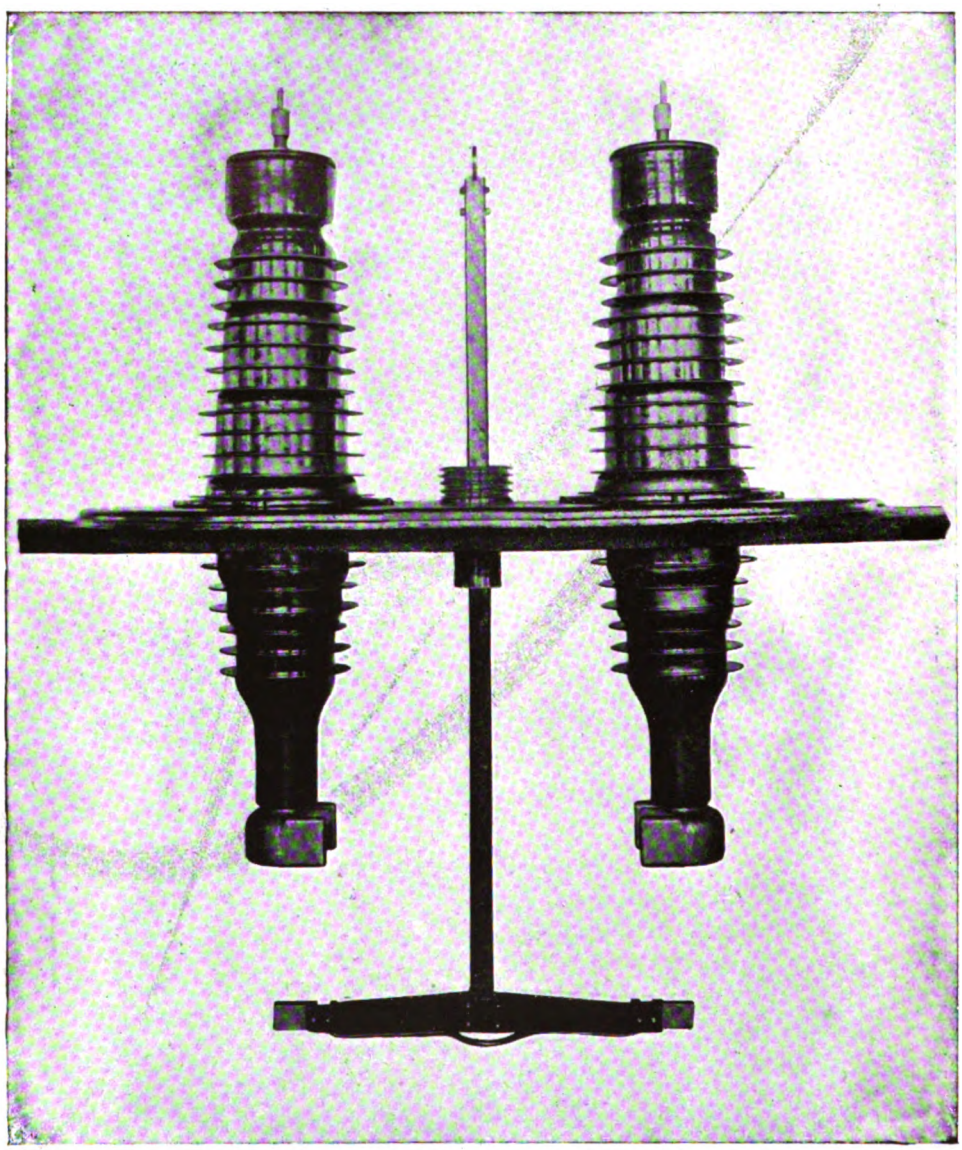


FIG. 30
Contacts and Insulators for 110,000 Volt Switch

Digitized by Google

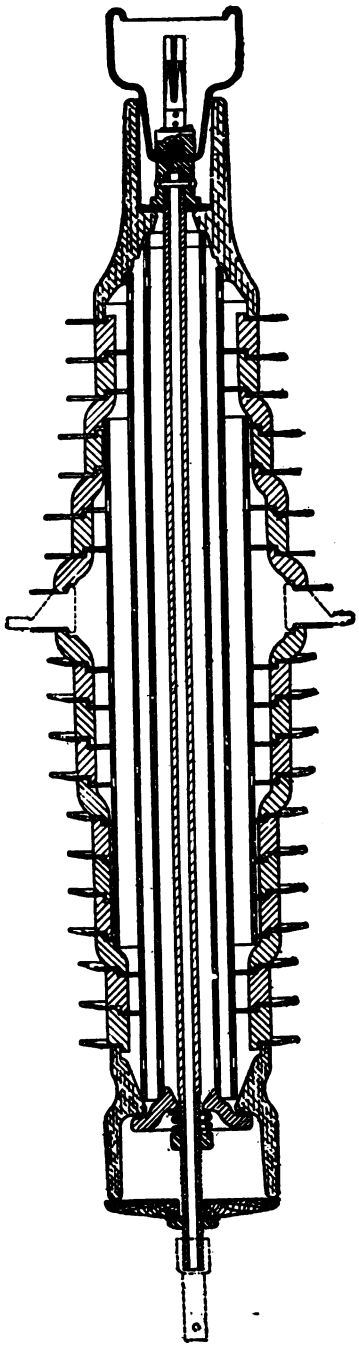


FIG. 31
Cross-Section of Bushing for 110,000-Volt Oil Switch

Digitized by Google

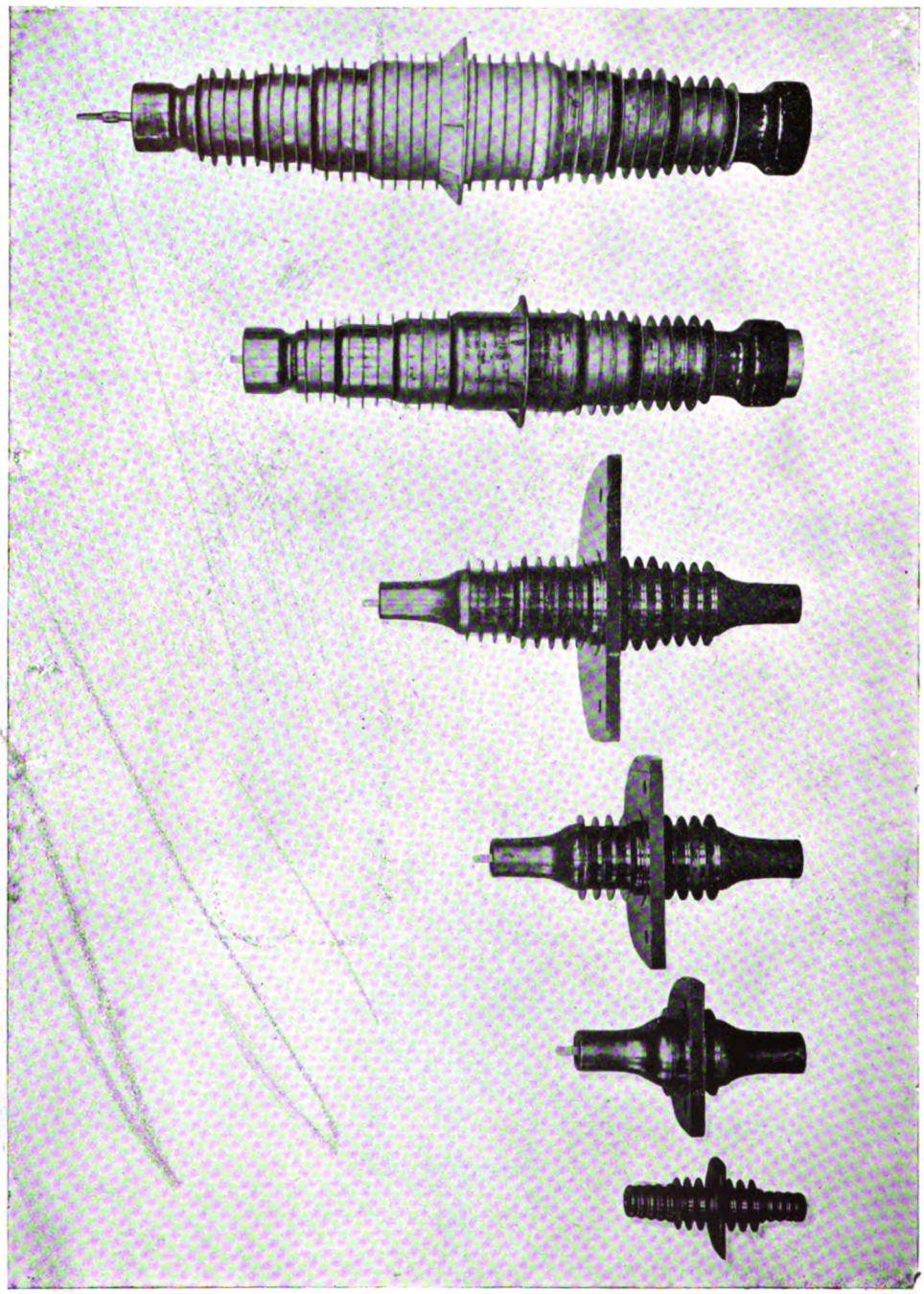


FIG. 32
Oil Switch Bushings for 22,000 to 110,000 Volts

Digitized by Google

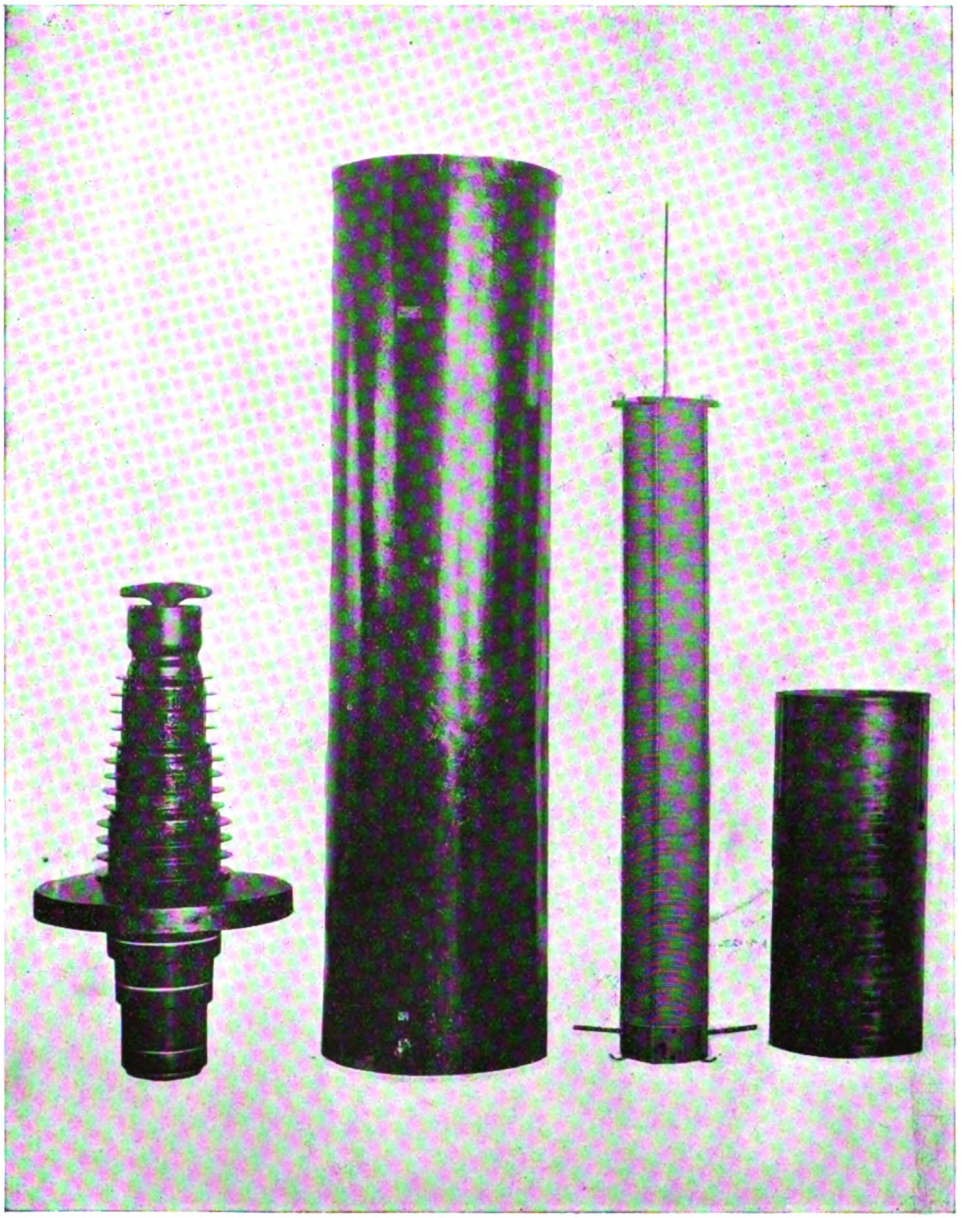


FIG. 33
Disassembled View of 110,000 Volt Aluminum Lightning Arrester

Digitized by Google

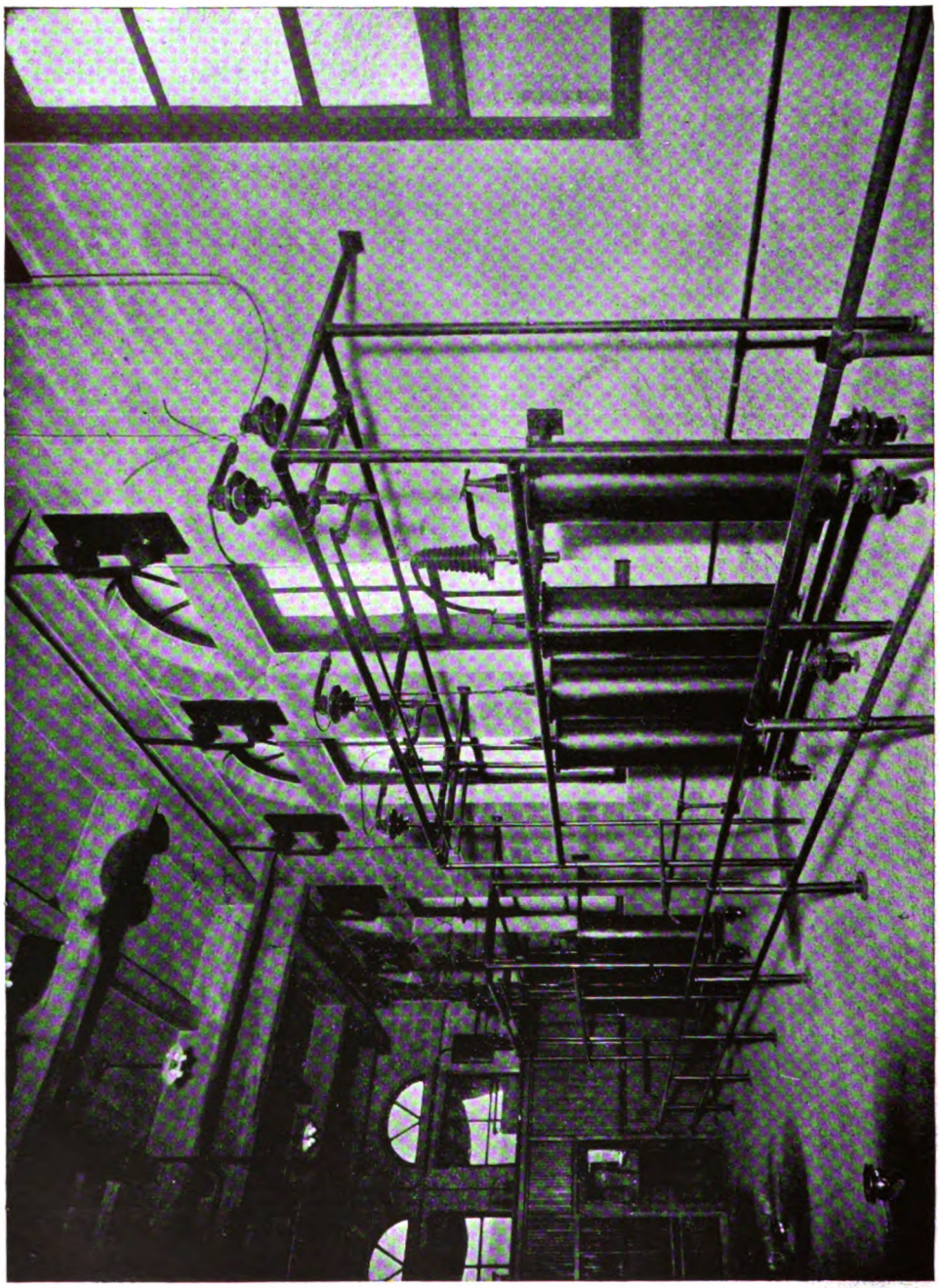


FIG. 34
44,000-Volt—Three-Phase Aluminum Lightning Arrester Installation

Digitized by Google

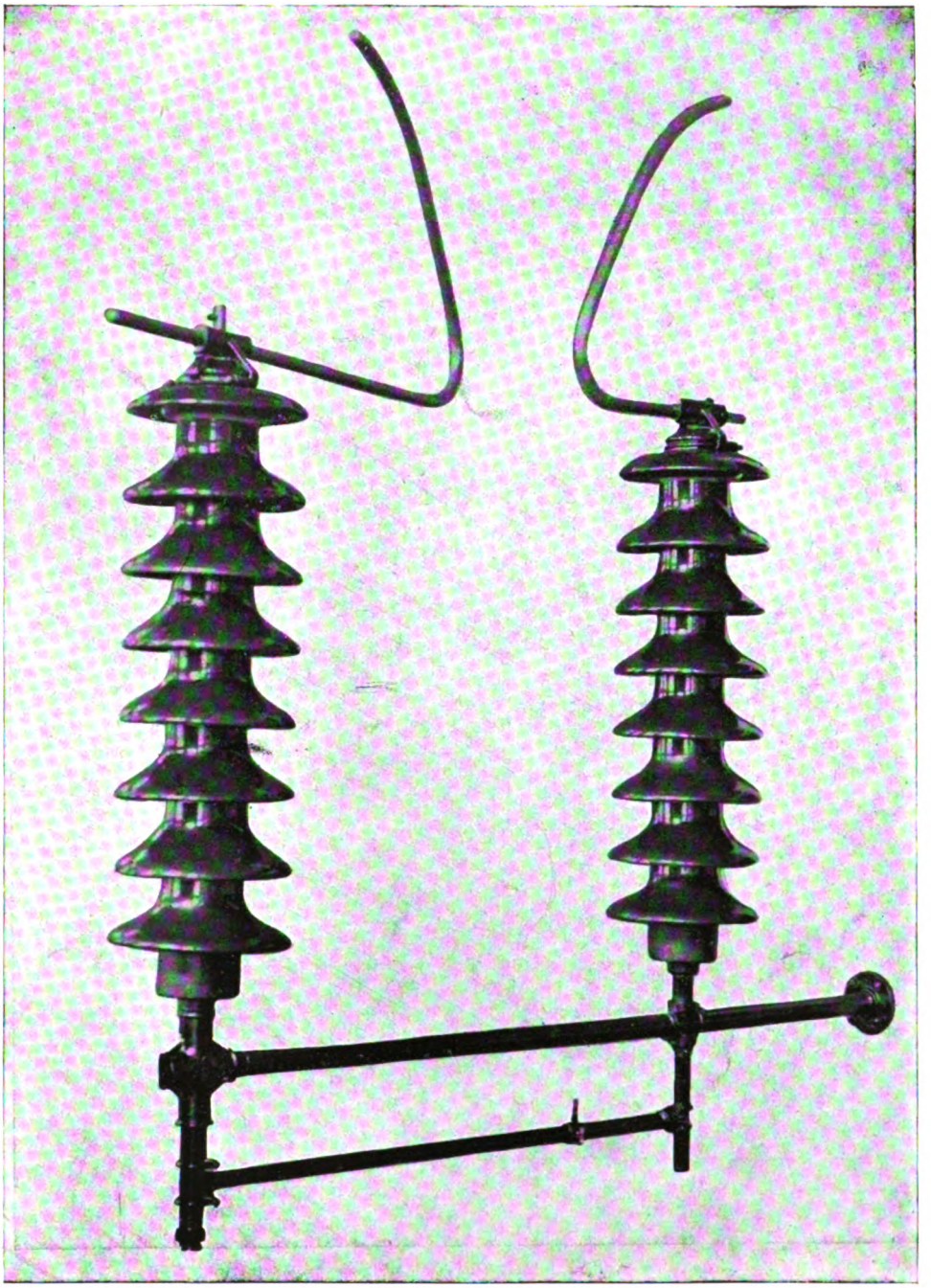


FIG. 35
Horn Gap for 110,000 Volt Aluminum Lightning Arrester

Digitized by Google

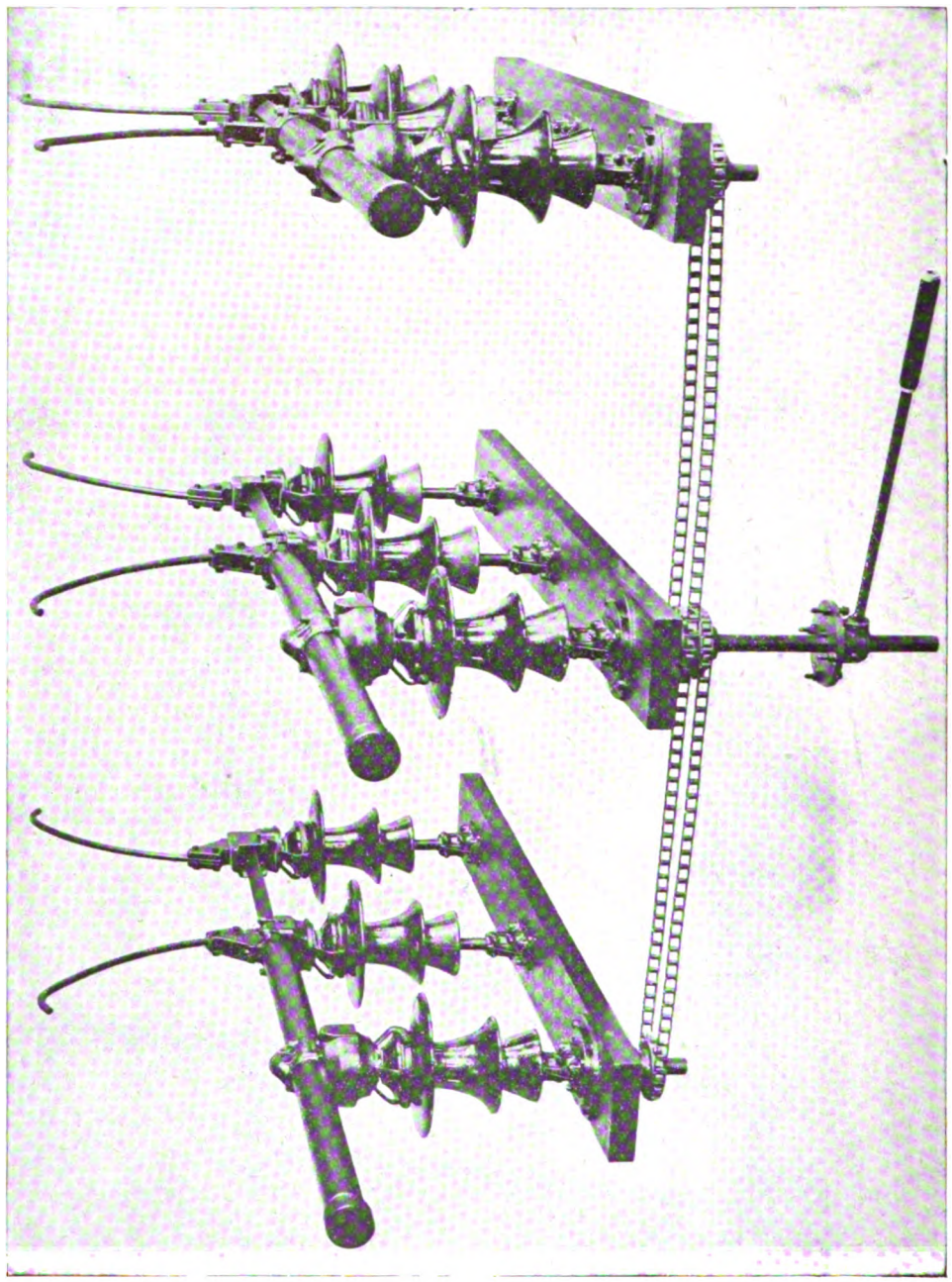


FIG. 36
70,000 Volt—3 Pole Out-door Disconnective Switch

Digitized by Google

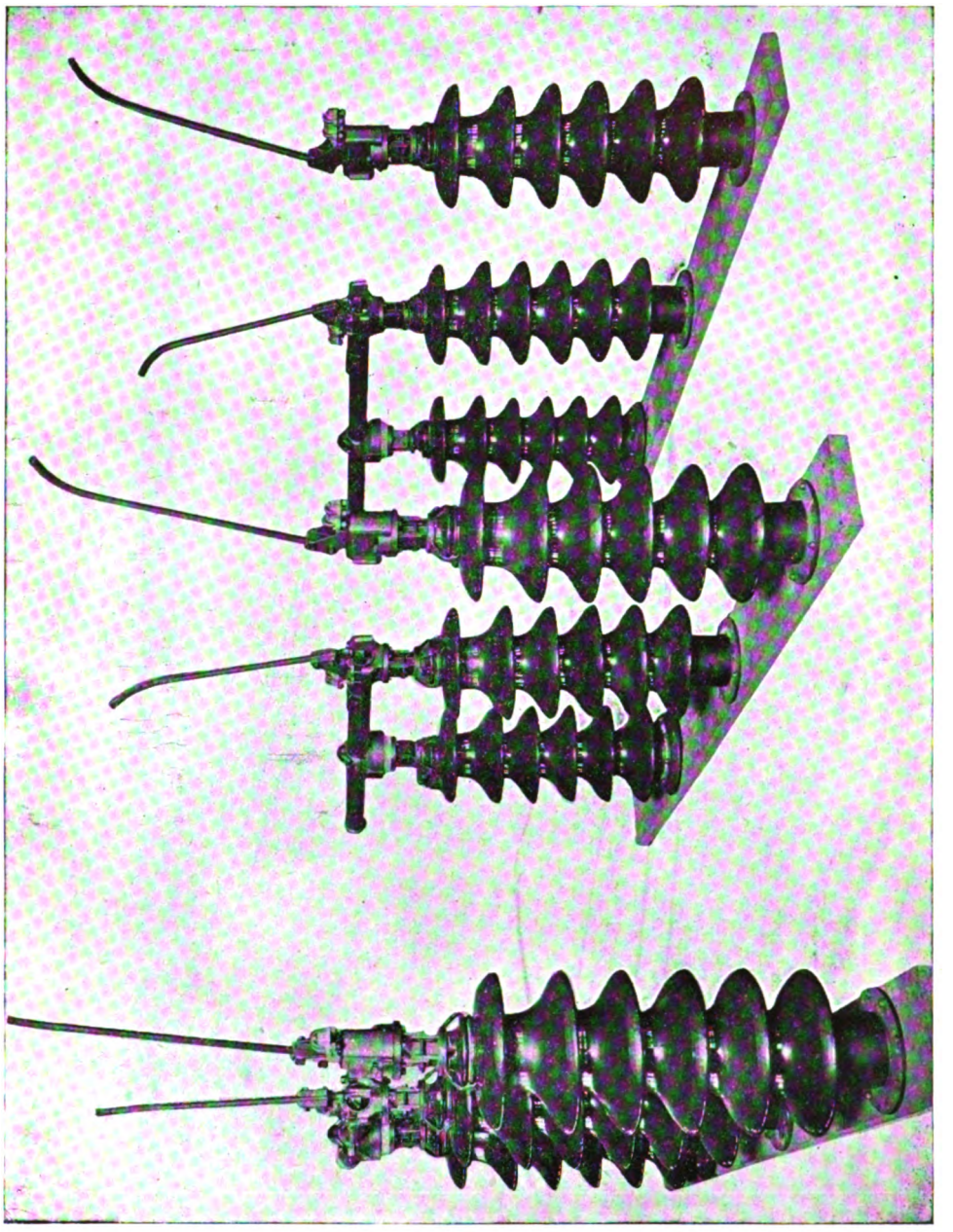


FIG. 37
Triple Pole—90,000 Volt Bolt Type Outdoor Disconnecting Switch

Digitized by Google

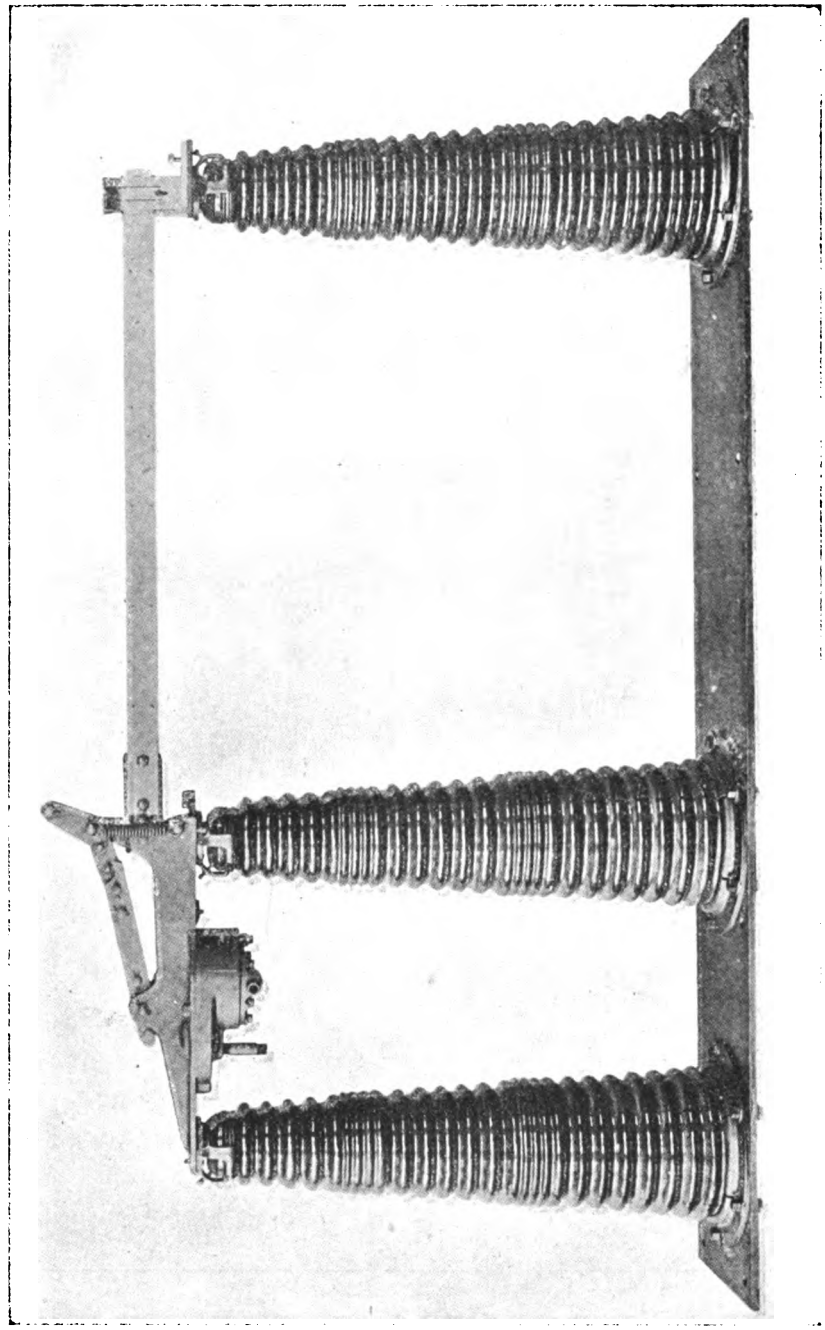


FIG. 38
View of a 110,000 Volt Disconnecting Switch Pneumatically Operated

Digitized by Google

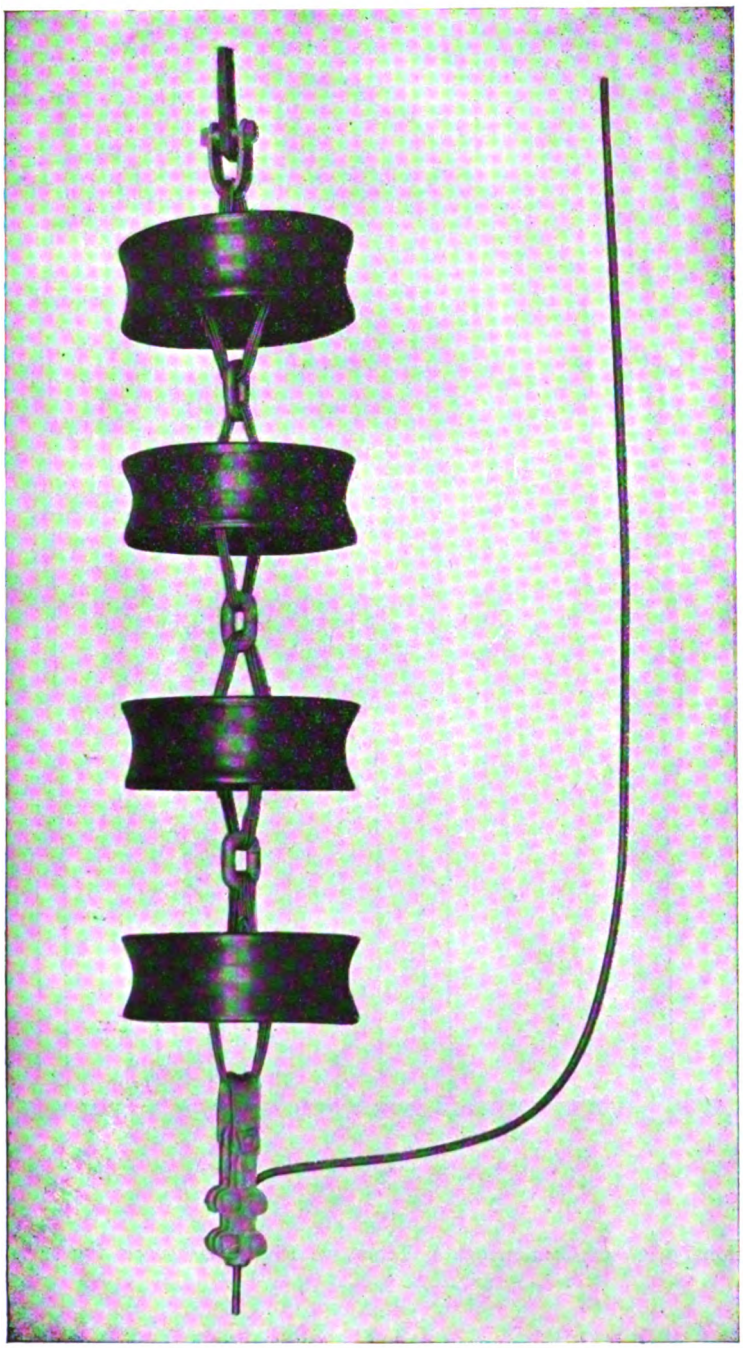


FIG. 39
View of 100,000 Volt Line Insulators—Strain Type.

Digitized by Google

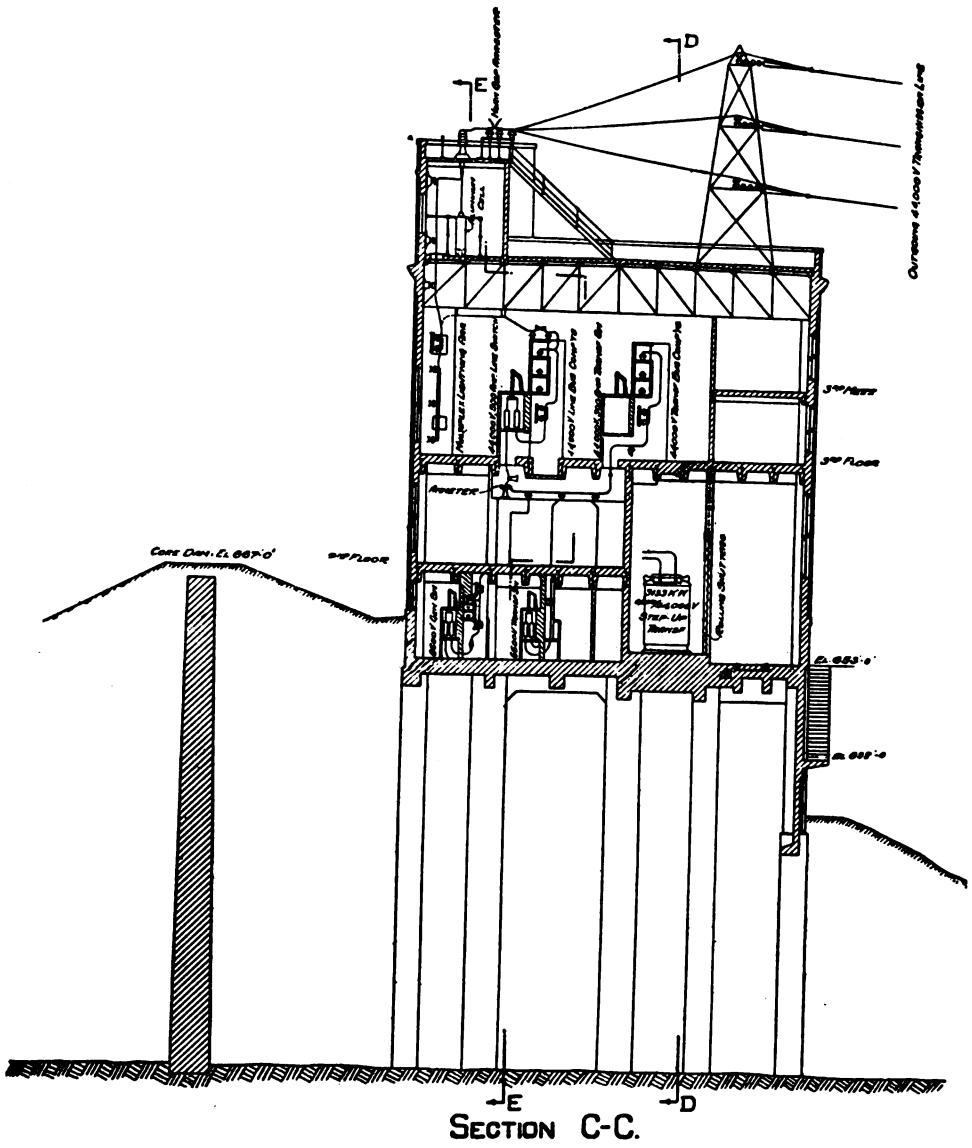


FIG. 40
Sectional View of Chattanooga & Tennessee River 44,000-Volt Power Station

Digitized by Google

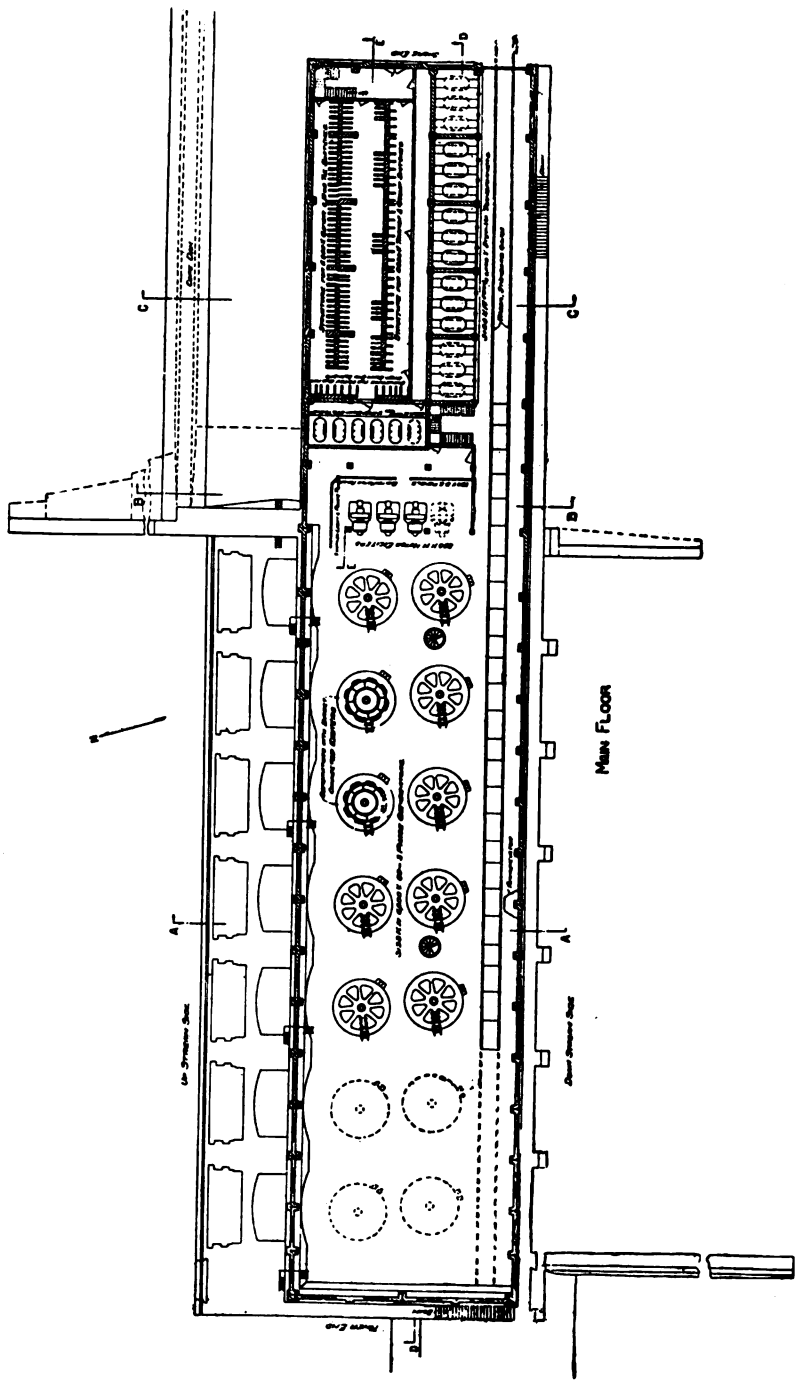


FIG. 41
Plan View, Chattanooga & Tennessee River Power Station

Digitized by Google

D. — 44,000 Volt — 40,000 K. W. Station High Tension Switches and Wiring in Compartments.

Figs. 40 and 41 illustrate the arrangement of a station of this type. It is not of the General Electric Company's design, but it is placed here with their plans because their apparatus is being installed. The 3-pole high-tension oil switches are similar in construction to the 6,600-volt switches, but with greater spacings between phases and greater insulation. All buses and wiring are placed in fireproof compartments.

This type of construction is not as cheap as the open-air type installation of switches and wiring, but as it has been used in several important installations, it deserves to be at least mentioned in this report.

E. — Transmission Lines.

Figs. 42 and 43 give the typical designs of the 44,000 volt and 110,000 volt towers figured in the estimate given in the report.

Fig. 44 gives a view of a 44,000 volt double circuit line using a three-legged tower, while Fig. 45 illustrates the design of a special 190-foot tower for 1,500 feet span over a navigable river.

Digitized by Google

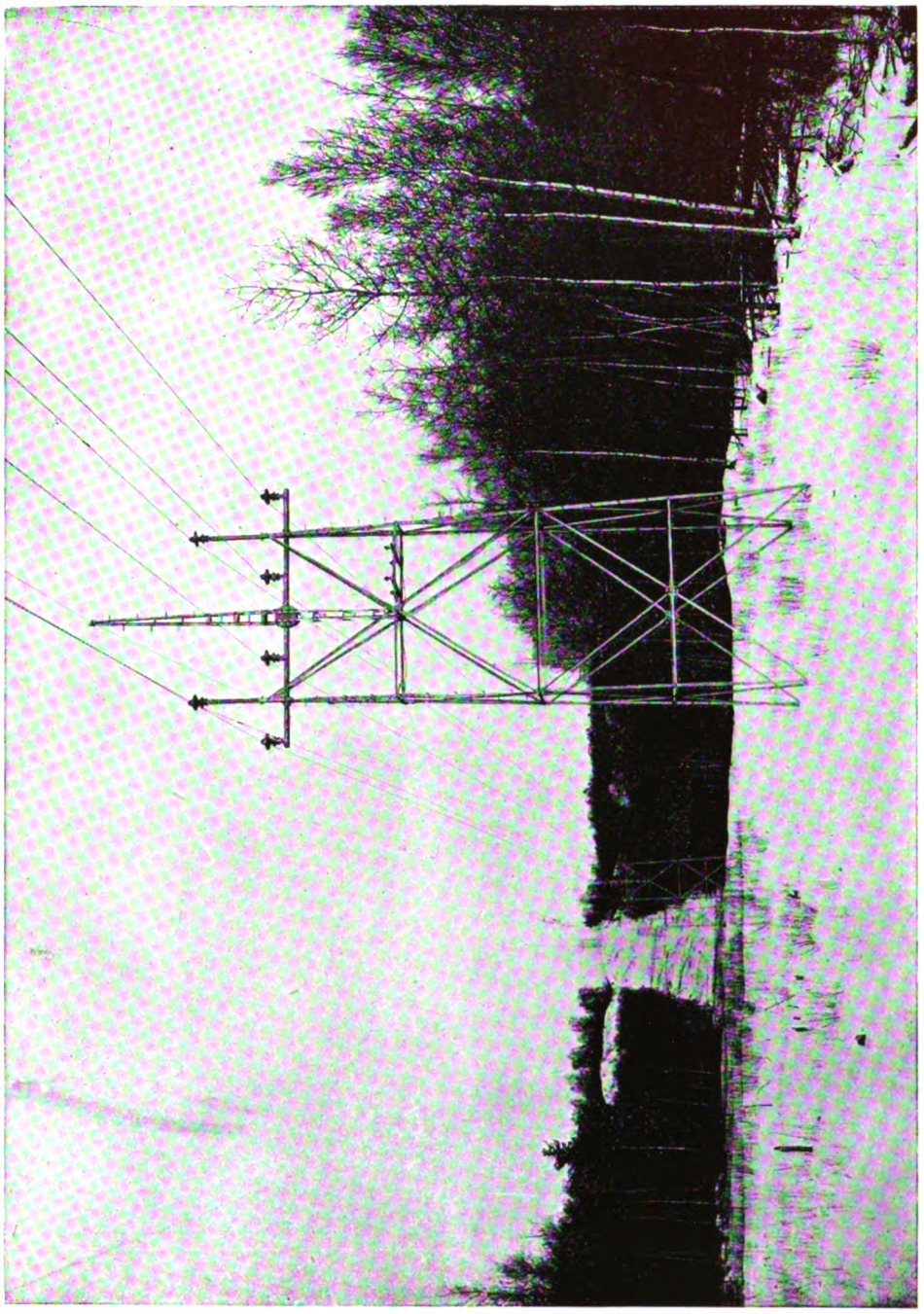


FIG. 42
44,000-66,000-Volt Transmission Tower

Digitized by Google

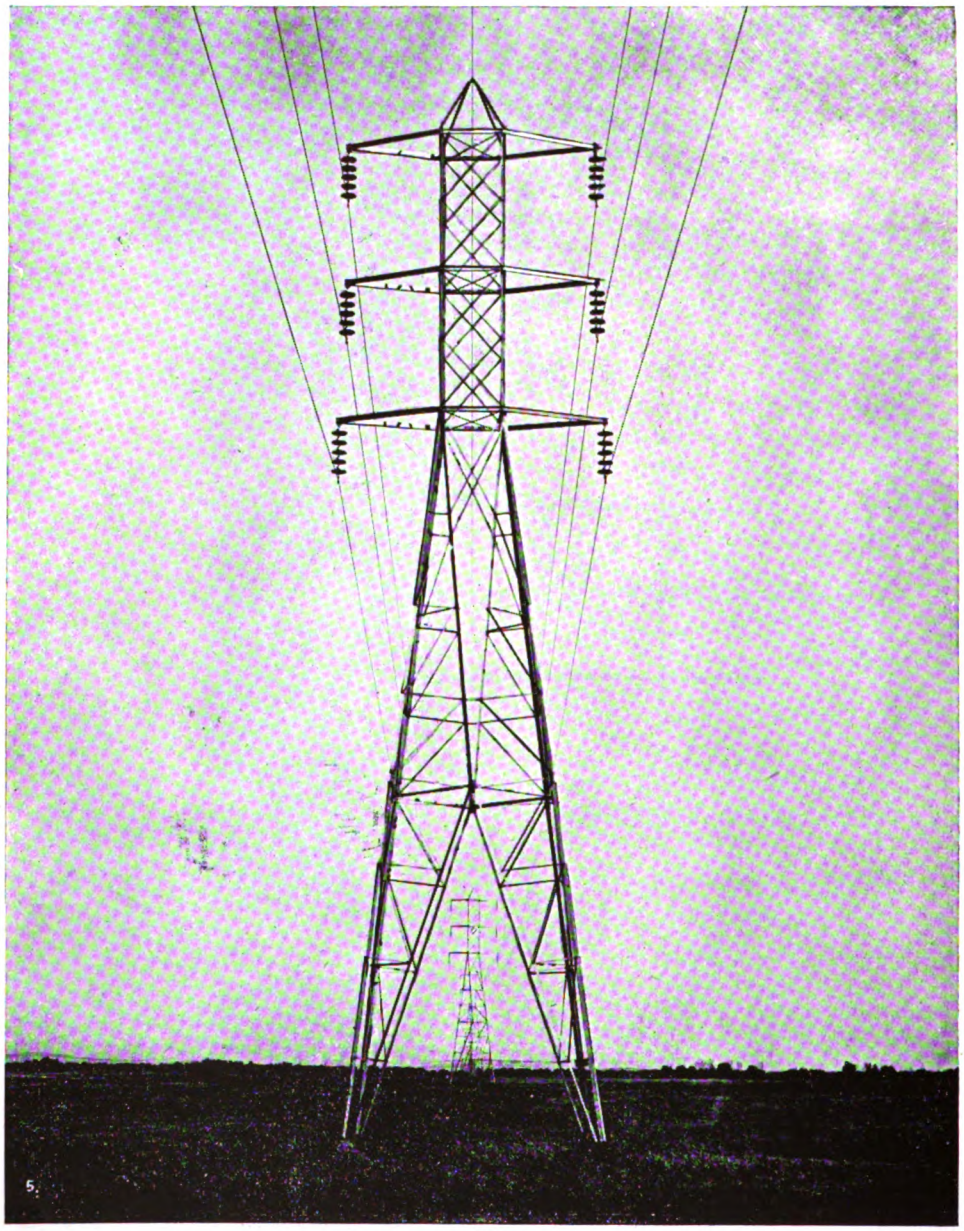


FIG. 43
100,000-Volt Transmission Tower

Digitized by Google

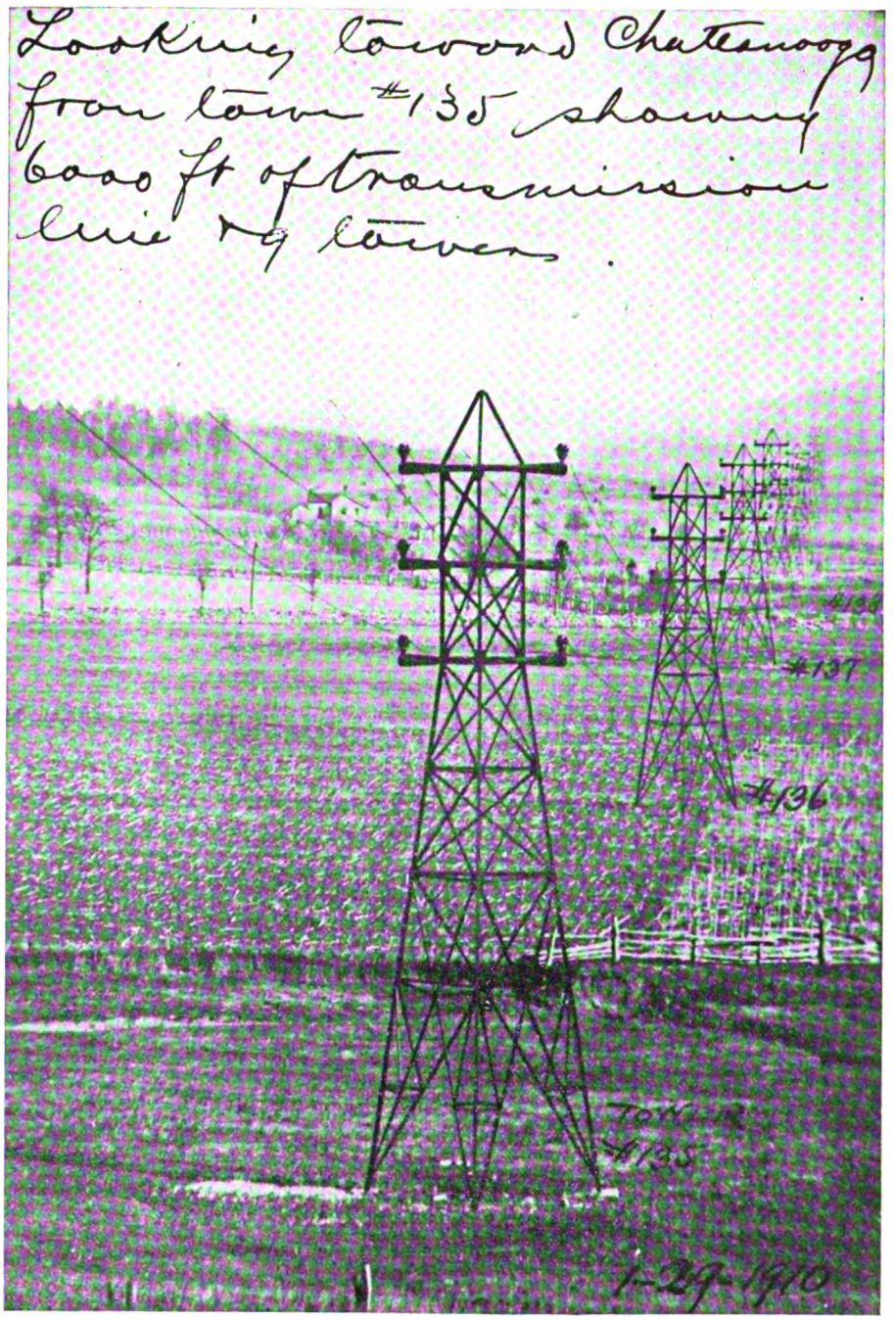


FIG. 44
Standard Towers, 44,000-Volt Transmission, Chattanooga & Tennesse River Power Company

Digitized by Google

FIG. 45
190 Foot River Tower, 1,500 Foot Span, Chattanooga & Tennessee River Power Company

Digitized by Google

APPENDIX II

CONTINUITY OF SERVICE.

ABSTRACTS FROM OPERATING REPORTS OF HIGH-TENSION SYSTEMS

Great Western Power Company — California (J. P. Jollyman — Proceedings A. I. E. E., July, 1911).

4 — 10,000 K. W. generators, 60 cycles — transformers delta 100,000 volts. 153 miles main line and 1.1 miles branch line — two circuits — 3/0 B. & S. copper wire on main line — No. 6 B. & S. on branch line — one overhead ground wire. Territory low elevation. In operation since November 1, 1909.

Lightning. — Entire absence of lightning.

Insulators. — Have had three or four broken in one year. Believe all were mechanically damaged before failed electrically. Consider insulator a success.

Oil Switches. — Had no difficulty in opening load, short circuit or charging current. Indications that they would operate on a considerably larger system.

Electrolytic Lightning Arresters. — On each end of main line. No lightning experience. On surges they cannot absorb much energy without being damaged, and, therefore, their critical voltage must be higher than any dynamic voltage that may ever occur upon the system.

Wind and Sleet. — No sleet, nor any trouble from wind.

Corona. — No appreciable effect on main line. Probably no very great increase in voltage would produce corona on branch line.

Digitized by Google

General Comments. — Insulation should be of a character especially adapted to withstand transient voltage strains considerably in excess of the delta voltage.

Southern Power Company — North Carolina (W. S. Lee — Proceedings A. I. E. E., July, 1911).

24,000 K. V. A., 60 cycles — transformers 44,000 volts delta to 100,000 volts star-grounded. 238 1/2 miles main line and 18 branch line — two circuits — 2/0 B. & S. copper or aluminum wire — one overhead — 3/8-inch S. M. ground wire. In operation since October 24, 1909, and January 1, 1910.

Lightning. — Frequent lightning storms. The 100,000 volt lines stood the lightning better than the lower voltage lines. 16 months, 96 1/2 miles had 8 shut-downs due to lightning — time lost, 39 minutes. 16 months, 161 miles had 14 shut-downs due to lightning — time lost, 59 minutes.

Insulators. — Some hooks have pulled out of insulators. Have never had a line put out of service due to failure of insulators, excepte during a sleet storm when three hooks pulled out.

Oil Switches. — With condenser terminals. Operate equally satisfactorily as lower voltage switches.

Electrolytic Lightning Arresters. — Give successful and satisfactory operation.

Sleet and Wind. — Sleet caused three hooks to pull out of insulators soon after the line was put up. Insulators swing with the line in wind. Have had no trouble from circuits on opposite sides of the tower swinging together and have never observed any dangerous and noticeable tendency to do so.

Corona. — Not noticeable.

Digitized by Google

Great Falls Power Company — Montana (M. Hibgen — Proceedings A. I. E. E., July, 1911).

6 — 3,500 K. V. A., 60 cycle generators. Transformers delta — 100,000 volts — two separate single circuits. 130 mile lines and one extension of 22 miles — a total of 282 miles single circuit lines — No. 0 B. & S. copper wire — and two $^3/_8$-inch S. M. overhead ground wires. In operation for six months.

Lightning. — Severe storms in summer. Experience only available for the winter and spring months. Had some lightning storms in vicinity of line causing no shutdowns. Believe the overhead ground wires will afford immunity from lightning.

Insulators. — No mechanical or electrical failure, except one case of outside interference by rifle.

Oil Switches. — With oil filled bushings. Entirely satisfactory. Have broken the short circuit of the 21,000 K. W. plant. Not tried yet to break charging current.

Electrolytic Lightning Arresters. — Discharge during lightning storm and when any high-tension switching is done. No trouble with the arresters.

Sleet and Wind. — Line withstood successfully one severe sleet storm and also several winds estimated at 60 miles per hour. No difficulty has been experienced with insulators swinging in the wind. The maximum deflection observed sideways the line was not over 30 degrees. A considerable deflection along the line has been noticed on insulators located between a long span and a short span due to changes of temperature affecting unequally the tension on the two spans. This action deserves considerable attention.

Corona. — For the first days of operation corona was plainly visible, then gradually disappeared. It is believed that this corona formed on small points or other roughness of the wire and that these have gradually worn off or burned off.

Digitized by Google

General Comments. — During the six months' operation nothing has developed to indicate that the operation of a 100,000 volt system is any more difficult than the operation of a 50,000 volt system. It is believed that the extra high insulation provided for this voltage prevents many breakdowns, due to lightning and surges, which would occur on a system operating at 50,000 or 60,000 volts with insulators designed for a factor of safety of two or three, as is commun with such systems.

Southern California Edison Company — (Discussions N. E. L. A., June, 1911).

6 — 1,667 K. W. 60 cycle transformers, 118 miles double circuit 75,000 volt line — No. 0000 copper — Pin insulators.

Insulators. — Had troubles due to a peculiar fault of pin-type insulators upon which cracks develop on the interior petticoat, attributable probably to excessive temperature. Also difficulty encountered on account of birds standing on steel cross arms and their outstretched wings touching the live circuit wire. This trouble can be overcome by the use of suspension insulators. In one year the total line interruptions totaled 160, most of which occurred during the spring season when the birds were more inclined to stand upon the transmission lines.

Toronto Electrical Company — (Discussions, N. E. L. A., June, 1911).

90 miles — 60,000 volt line — 25 cycles — Niagara and Toronto transmission. Pin insulators. All interruptions during last ten months were due to lightning. Three interruptions in May — none in the previous nine months.

Seattle - Tacoma Power Company — Washington (M. T. Crawford - Proceedings A. I. E. E., April, 1911). Step up transformers, capacity 15,000 K. W. 60 cycles, delta connected (22,500 K. W. since November, 1910).

Transmission Lines. — Wood poles and cross arms; 63 miles two single-circuit pole lines and 46 single-pole lines; total 172

Digitized by Google

miles. Lines were built 10 years ago, for a voltage of 30,000 volts. Since December, 1909, the voltage was raised to 60,000 — Wires No. 4/0 and 2/0 B. & S. aluminum; and No. 4 B. & S. copper. Spacing 7-9 feet. Rough country and rather severe conditions of transmission. Neutral ungrounded.

Insulators. — One-piece triple petticoat, 30,000 volts insulators, replaced by four-piece, brown porcelain, 60,000 volt insulators. Impregnated wood pins; after 7 years' service burned pins caused considerable trouble; replaced by malleable cast-iron pins.

Circuit Breakers and Svitches. — High tension oil circuit breakers are *non-automatic*: Automatic instantaneous overload circuit breakers are used only for throwing lines in multiple on low tension side of sub-stations and for tie lines. Outdoor line disconnecting switches are of the pole-top type.

Electrolytic Lightning Arresters. — One on each end of each line since December, 1909. Territory comparatively free from lightning. Lightning caused only two partial interruptions in the year 1907 when multigap arresters were installed — none since.

System of Operation. — Non-automatic operation; control of lines completely in the hands of trained operators. Rheostats of iron wire immersed in the tail race are thrown on generator buses whenever a heavy load is dropped or lines are disconnected for locating troubles.

Short circuited lines if not burned clear within 8 seconds are cut out after generator voltage has been automatically lowered through a Tirrill regulator with a special relay.

In the case of arcing grounds lines are cut out without attempting to burn clear, electrolytic lightning arresters taking surges off of line.

Service Interruptions:

66 interruptions during the 4 years, 1907 to 1911.

43 occurred when voltage was 30,000 (35 months), classified as follows:

Digitized by Google

6 — due to defective insulators (2), burned off wooden pins (2), and defective pole switches (2).

5 — to failures of transformers.

7 — to outside interference: malicious interference (4), blasting stumps (3).

14 — to winds (5), salt fogs (3), fires (2), floods (2), landslide (1), snow (1).

2 — to mistakes.

7 — to unknown causes.

2 — to lightning.

In 21 interruptions not more than $^1/_4$ of the load was dropped.

In 10 interruptions not more than $^1/_2$ of the load was dropped.

In 12 interruptions power was completely off the lines.

Of these 12 shutdowns

1 — was due to a burned wooden pin insulator, causing short circuit and arcing ground.

5 — to outside interference: malicious interference (3), blasting stumps (2).

5 — to winds (2), fire (1), flood (1), landslide (1).

1 — to unknown cause.

Note. — Of the 12 shutdowns 7 occurred during the half of 1909 when system was running on one line to permit reconstruction for 60,000 volts.

23 interruptions occurred since voltage was raised to 60,000 (13 months), classified as follows:

4 — due to defective insulators (1), defective pole switches (3).

1 — to failure of transformers.

7 — to outside interference: malicious interference (2), blasting stumps (2).

4 — to winds.

1 — to mistakes.

6 — to unknown causes.

None to lightning.

In 14 interruptions not more than $^1/_4$ of the load was dropped.

In 7 interruptions not more than $^1/_2$ of the load was dropped.

In 2 interruptions power was completely off the lines.

Of these 2 shutdowns:

1 — was due to a tree blown across line.

1 — to a corner pole cut down with an axe.

Digitized by Google

Taylor's Falls Transmission Line - Minnesota (J. F. Vaughan, Transactions A. I. E. E., May, 1908). Transformers — 10,800 K. W. 60 cycles; delta, delta connected — 50,000 volts. 40 miles *pole line*, iron pin porcelain insulators — single circuit No. 4/0 B. & S. copper wires (six months, 1907).

Lightning Protection. —

(1) Power house: low equivalent multigap arresters.
(2) Sub-station: same and electrolytic arresters.
(3) Transmission line: different kinds of devices available were tried out and compared, that is to say:

(a) **Horn Arresters.** — Different types, with single, double and triple gap with water resistances, and water shunts on some gaps.

(b) **Ground Wires.** — In a 9 mile zone especially subject to lightning, hard drawn copper ground wires vere erected in $^1/_2$ mile lengths alternating with unprotected $^1/_2$ mile lengths and differently located above or below top line wire or near center of delta.

(c) **Lightning rods** of galvanized iron pipe. Four types in four different sections partly attached to the poles, partly on separate poles and at different intervals.

(d) 30 % of the total insulator pins were grounded.

Record of Storms. — During the period covered, March to October, 1907, 32 storms occurred. Records of protecting devices were taken by the use of telltale papers.

Insulator Fallures. — Out of 5,500 insulators, 42 were damaged in 8 storms, nearly all shattered.

23 — were top insulators.
28 — were on more or less exposed height.
2 — only were damaged under ground wire (near to unprotected section).
3 — only were damaged under lightning rods on line poles.
None were damaged under lightning rods on separate poles.
2 poles with grounded pins were burned.
1 pole with ungrounded pins was split.

Digitized by Google

The chief operating failures were due to short circuits and grounds from spilling over of insulators.

Conclusions. — Area of disturbance is always of limited length. Exposed heights and top insulators are specially liable to damage.

Grounding of pins has comparatively little effect on insulator breaks.

The shielding effect of the ground wire, specially when above the line, was very decided.

The activity of lightning rods, especially when on side of line, was marked.

Electrolytic arresters were more sensitive than other types.

Low equivalent type arresters operated satisfactorily, the brunt of the discharge, however, being taken by the simultaneous operation of horn arresters, which were effective in handling both static and dynamic discharges.

General Remarks.

Troubles due to swinging together of wires carried on suspension insulators have occurred on certain systems, in one case between the aluminum power wires and the steel ground wire, on account of uneven elasticity and inertia wave motion with changes of temperature, and in another case, in the canyons of the Central Colorado transmission line; but this fault is of a mechanical nature and engineers are overcoming it by proper re-arrangement of wires, spans and sags and by suitable changes in design of suspension insulators, so that extreme deflections may be prevented, thereby securing the advantages in this respect of the pin-type insulator construction.

The authentic record of largest accumulation of sleet is 2″ diameter with 1.9 pounds of sleet per running foot of wire.

Wind velocities of 165 miles have been recorded for very high altitudes in Colorado.

For high altitudes corona will limit transmission pressures to about 100,000 volts.

For more favorable conditions 140,000 volt transmissions are now being put into operation.

Digitized by Google

APPENDIX III.

STEAM GENERATING PLANTS, OR HYDRO-ELECTRIC POWER SUB-STATIONS, AND LOCAL TRANSFORMING AND DISTRIBUTING SUB-STATIONS.

In this Appendix are given some illustrations of several important steam plants. Their main details of electrical construction are equally applicable to large hydro-electric power receiving sub-stations operating in place of, or in conjunction with, local steam plants.

Low-Tension Distributing Systems. — To simplify the presentation of the report the writer has omitted the study of low-tension distributing systems. It is, however, pertinent here to state that practically $^3/_4$ of the electricity produced in the United States is ultimately distributed in the form of continuous current either for the operation of street railways or for lighting and power in large centers. Railway companies operate at 500 to 600 volts with grounded and in some cases undergrounded returns. Lighting and Power companies in large cities operate, in the central districts, continuous current three wire systems of distribution, with voltages varying from 2×110 to 2×120 Volts.

The continuous current is usually supplied from transforming sub-stations equipped either with synchronous converters or motor generator sets and large storage batteries as auxiliaries for insurance against emergencies. Illustrations of a few important sub-stations of this type are given in this Appendix. A unique system of three wire low-tension single phase alternating current distribution of the Louisville Lighting Company, is illustrated in Figs. 66, 67, 68 and 69. The large power customers are supplied with 500-volt continuous current.

Digitized by Google

Figs. 70, 71, 72 and 73 illustrate a good example of sub-station distributing underground 2,000-3,000 volt current for either block or house-to-house transformer distribution.

Fig. 74 illustrates a sub-station distributing overhead 2,200 volt current for house-to-house and block transformer distribution.

Digitized by Google

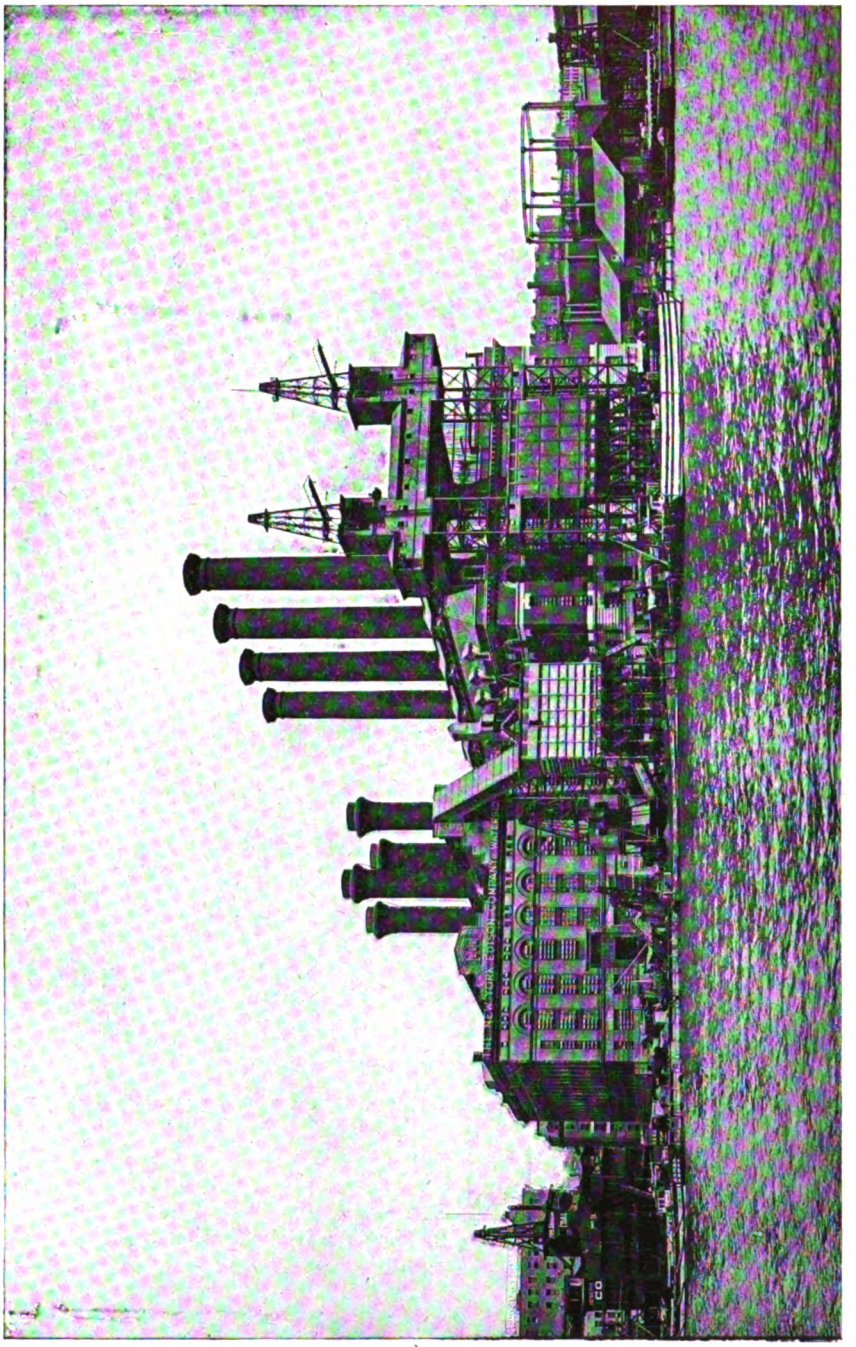


FIG. 46
Water Front View of the Waterside Stations No. 1 and No. 2 of the New York Edison Company
Total Generating Capacity Installed 214,000 K. W.—6,600 Volts—Being Installed—Two 20,000 K. W. Turbine Units.

Digitized by Google

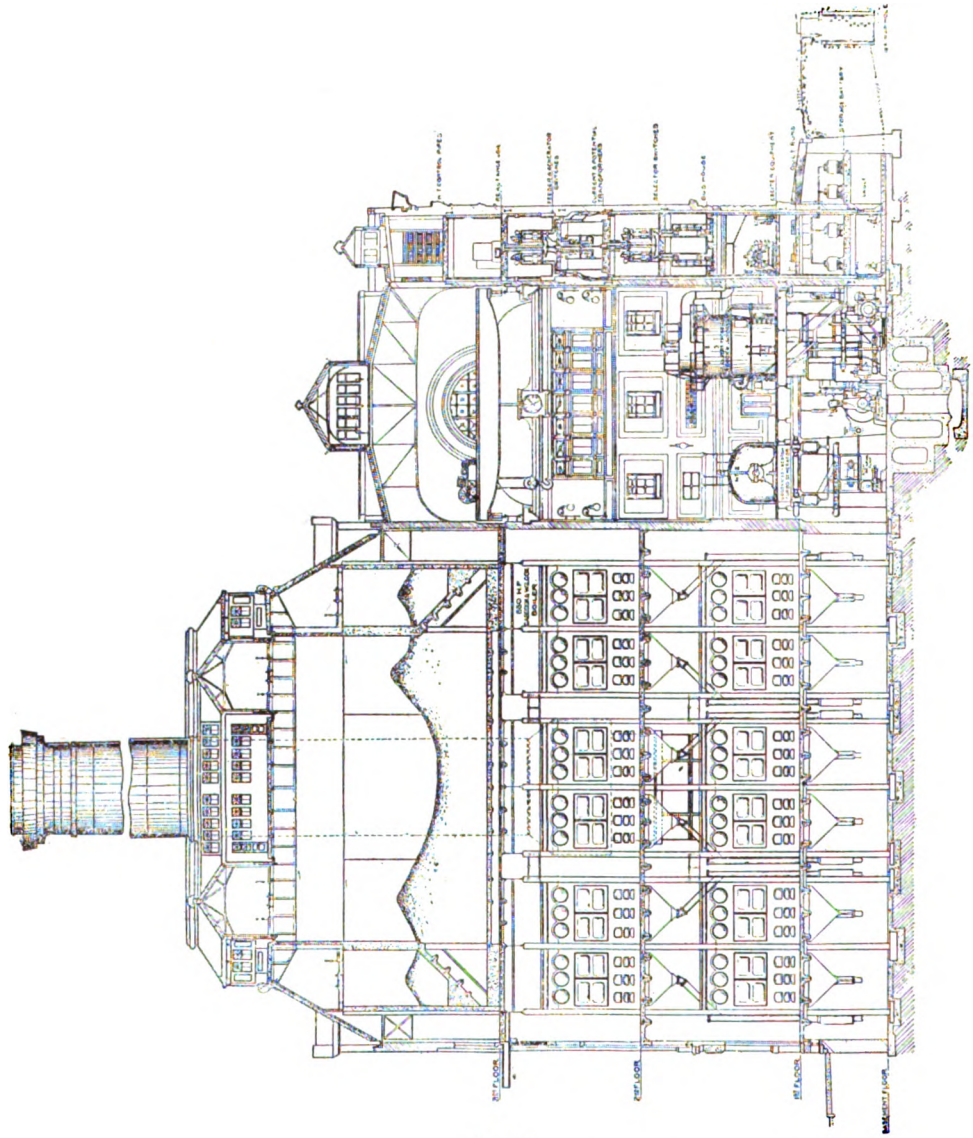


FIG. 47

Sectional View of Waterside Station No. 2, Showing High Tension Switches, Buses and Generator Reactances on Mezzanines, and Control Board in Front of the Station

Digitized by Google

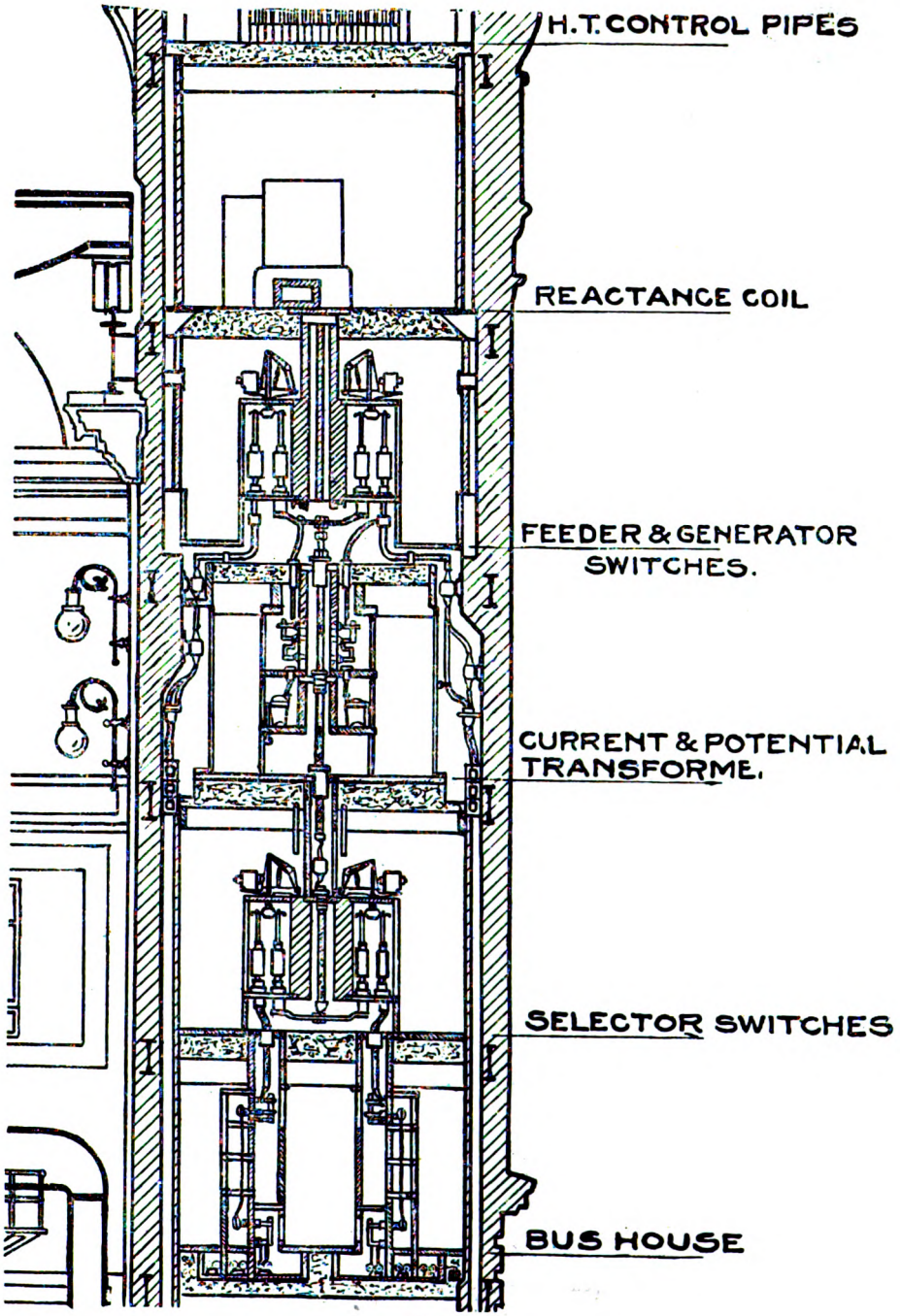


FIG. 48

Enlarged View of Part of Fig. 47, Showing High Tension Switches, Buses and Generator Reactances on Mezzanines

Digitized by Google

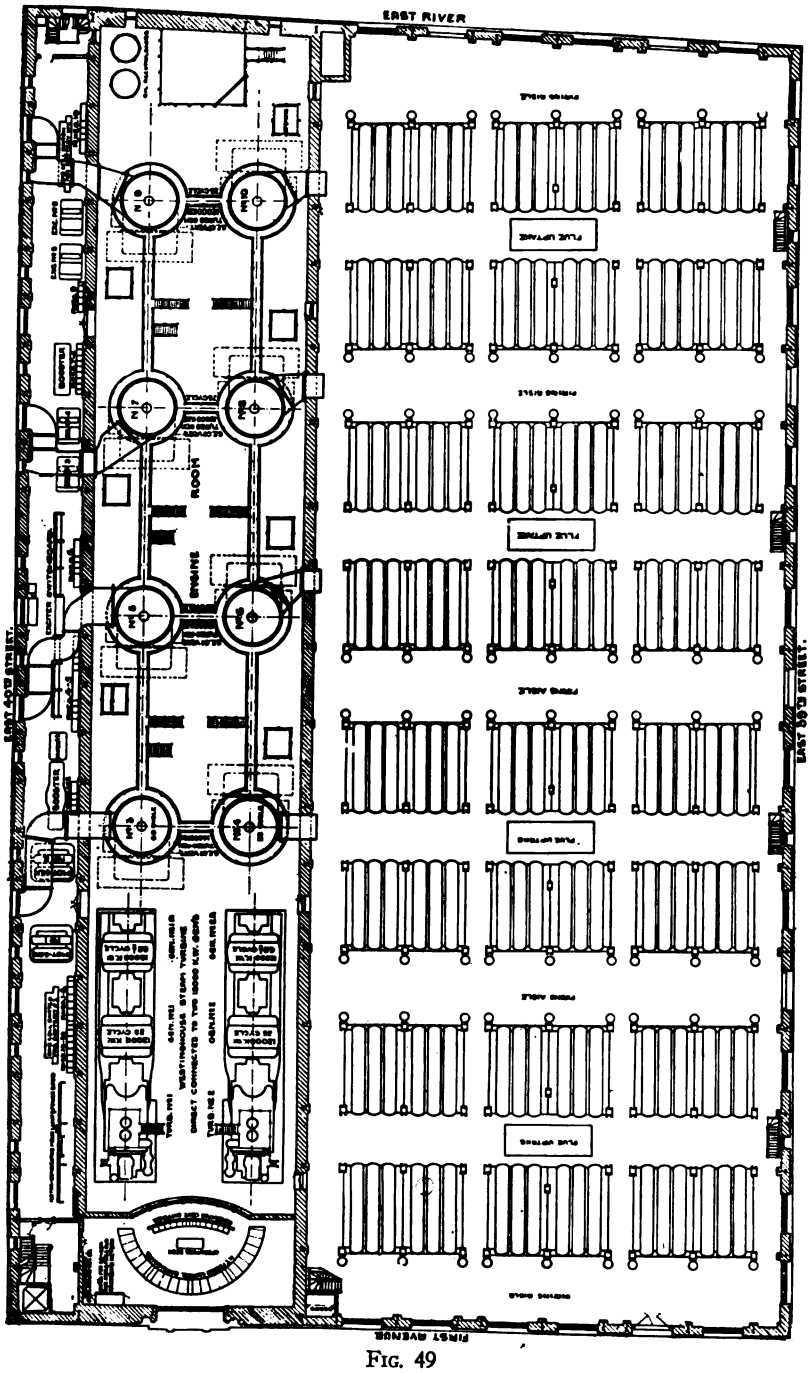


FIG. 49

Plan View of Waterside Station No. 2—Total Generating Capacity Installed, 124,000 K. W. and Two 12,000 K. W. 60-Cycle Generators on Double Frequency Turbines

Digitized by Google

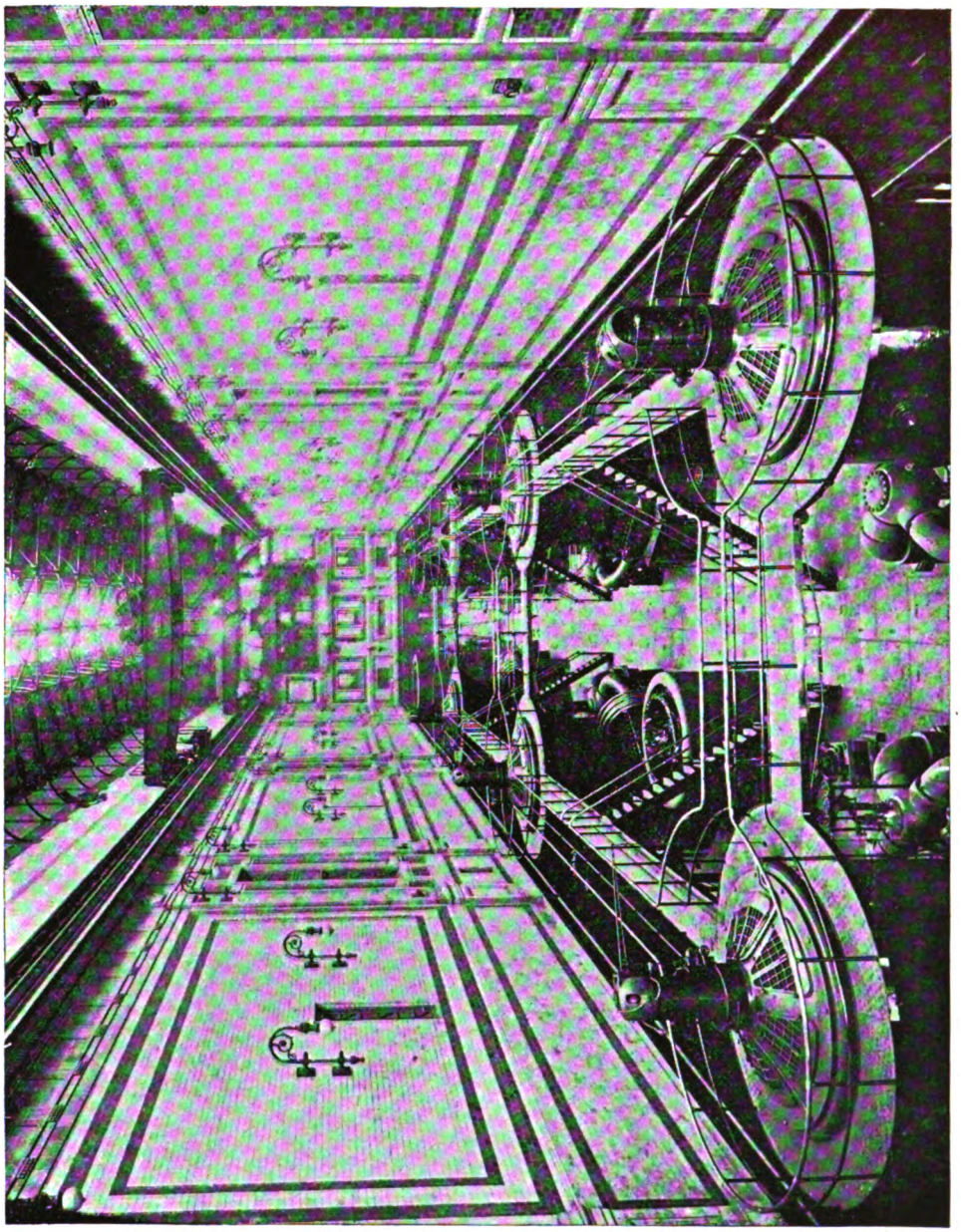


FIG. 50
Horizontal Westinghouse Double Frequency Generator Units
Interior View of Turbine Room, Waterside Station No. 2. Eight Vertical G. E. and Two

Digitized by Google

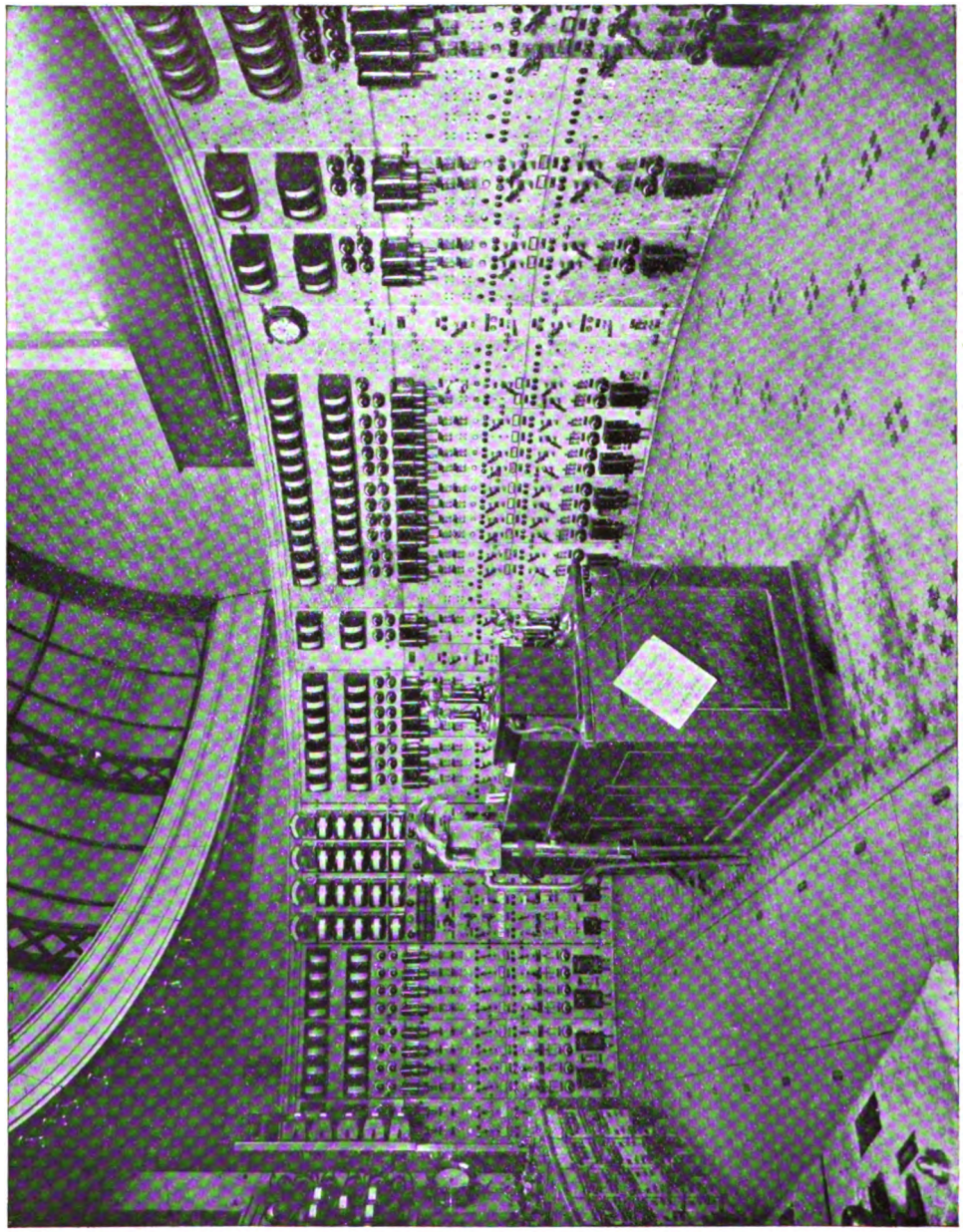


FIG. 51
High Tension Generator and Feeder Control Board, Waterside No. 2

Digitized by Google

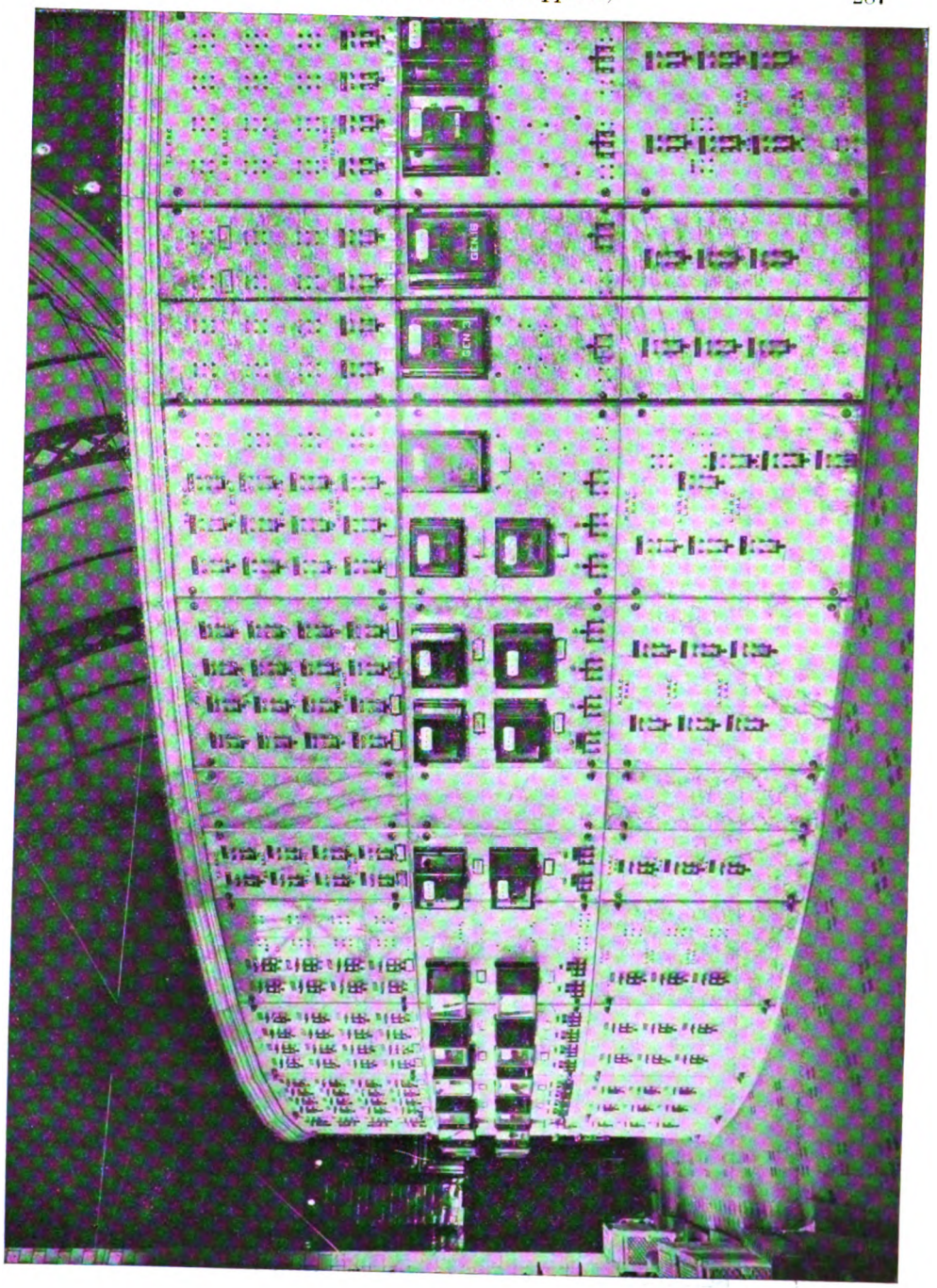


FIG. 52
View of Instrument and Testing Board. Spaced Four Feet in the Rear of Feeder Control Board of Fig. 51

Digitized by Google

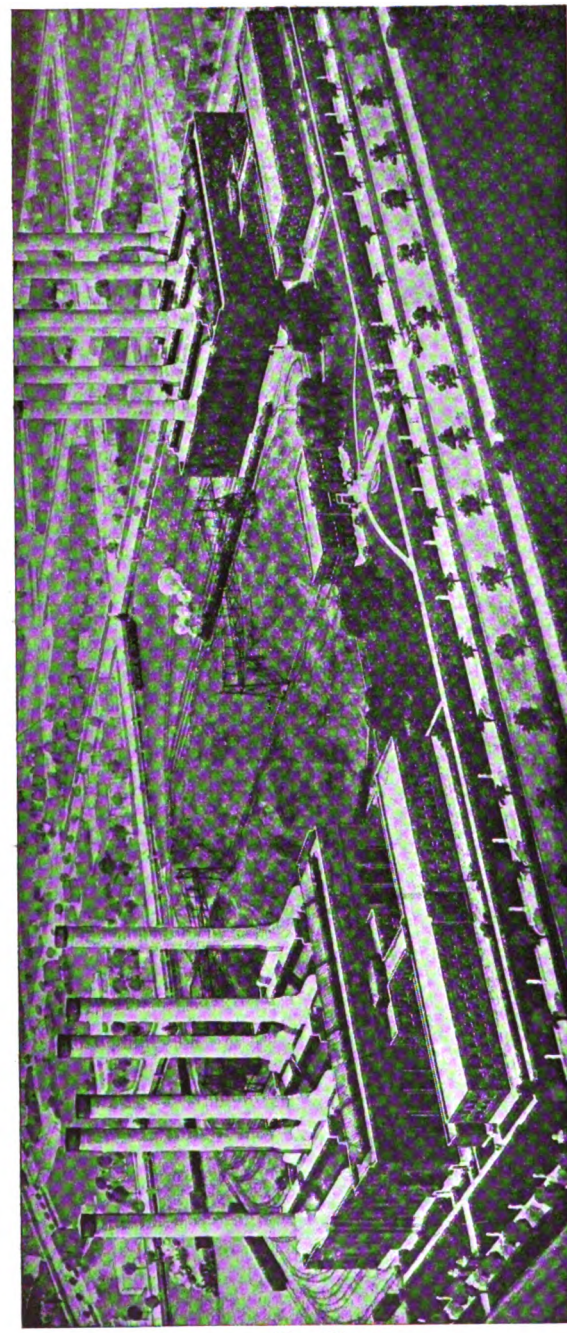


FIG. 53
Bird's-Eye View of the Twin Northwest Power Houses (One Under Construction) of the Commonwealth Edison Company—Chicago

Digitized by Google

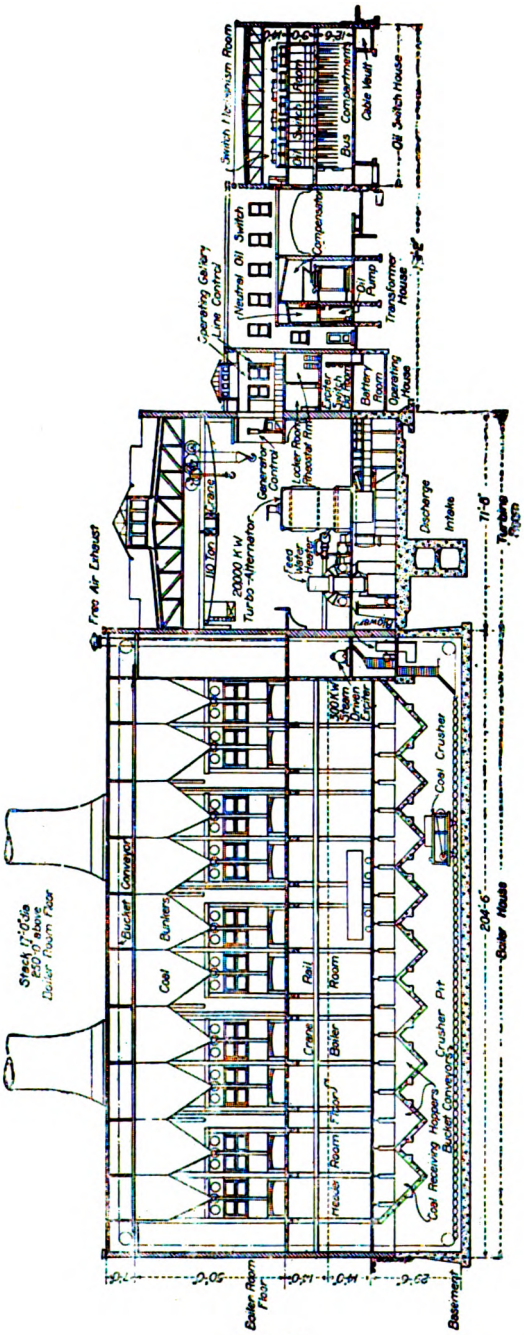


FIG. 54

Sectional View of the 120,000 K. W. 9,000-Volt Northwest Station, Showing **4,500-Volt** Auto-Transformers in Series with 20,000 K. W. 4,500-Volt Turbine Generators

Digitized by Google

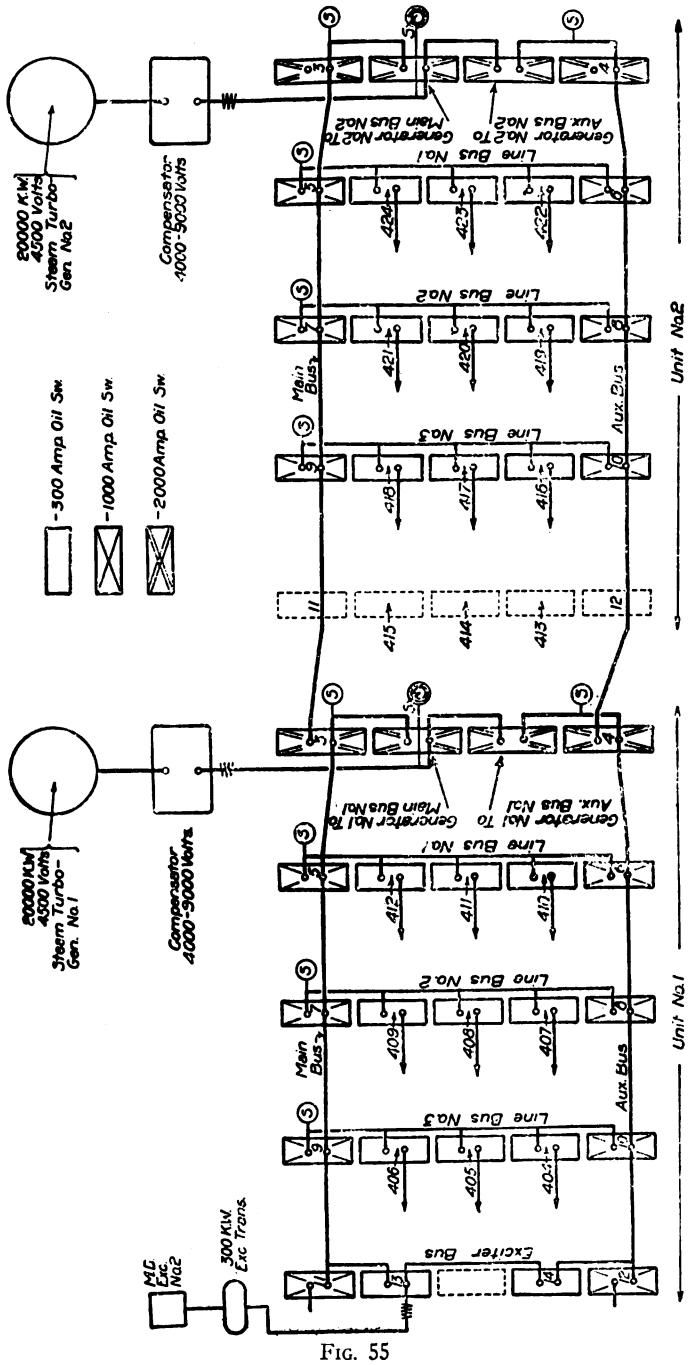


FIG. 55

Diagram of Electrical Connections Northwest Station

Digitized by Google

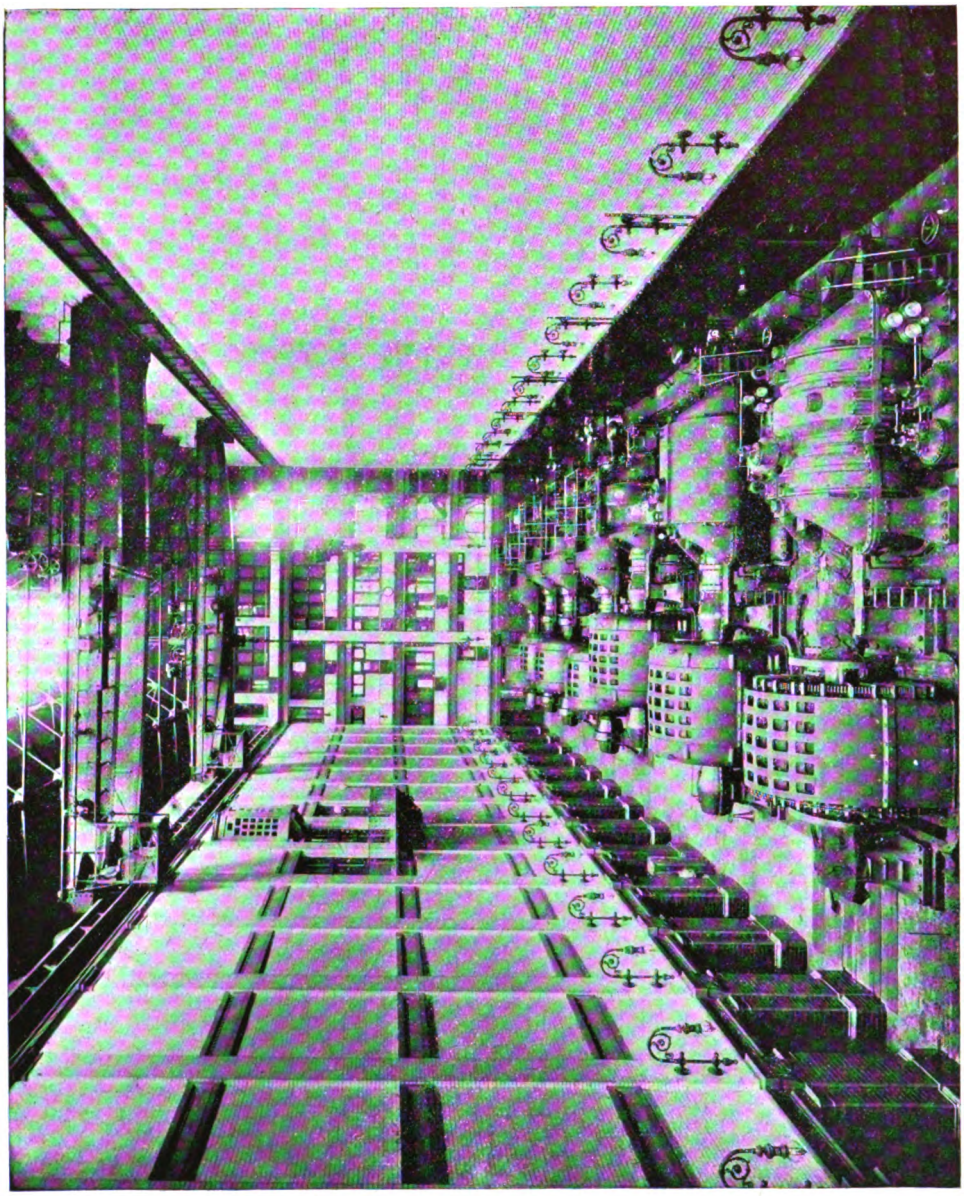


FIG. 56
Interior View of Turbine Room, Williamsburg Station, Brooklyn Rapid Transit Company, New York

Digitized by Google

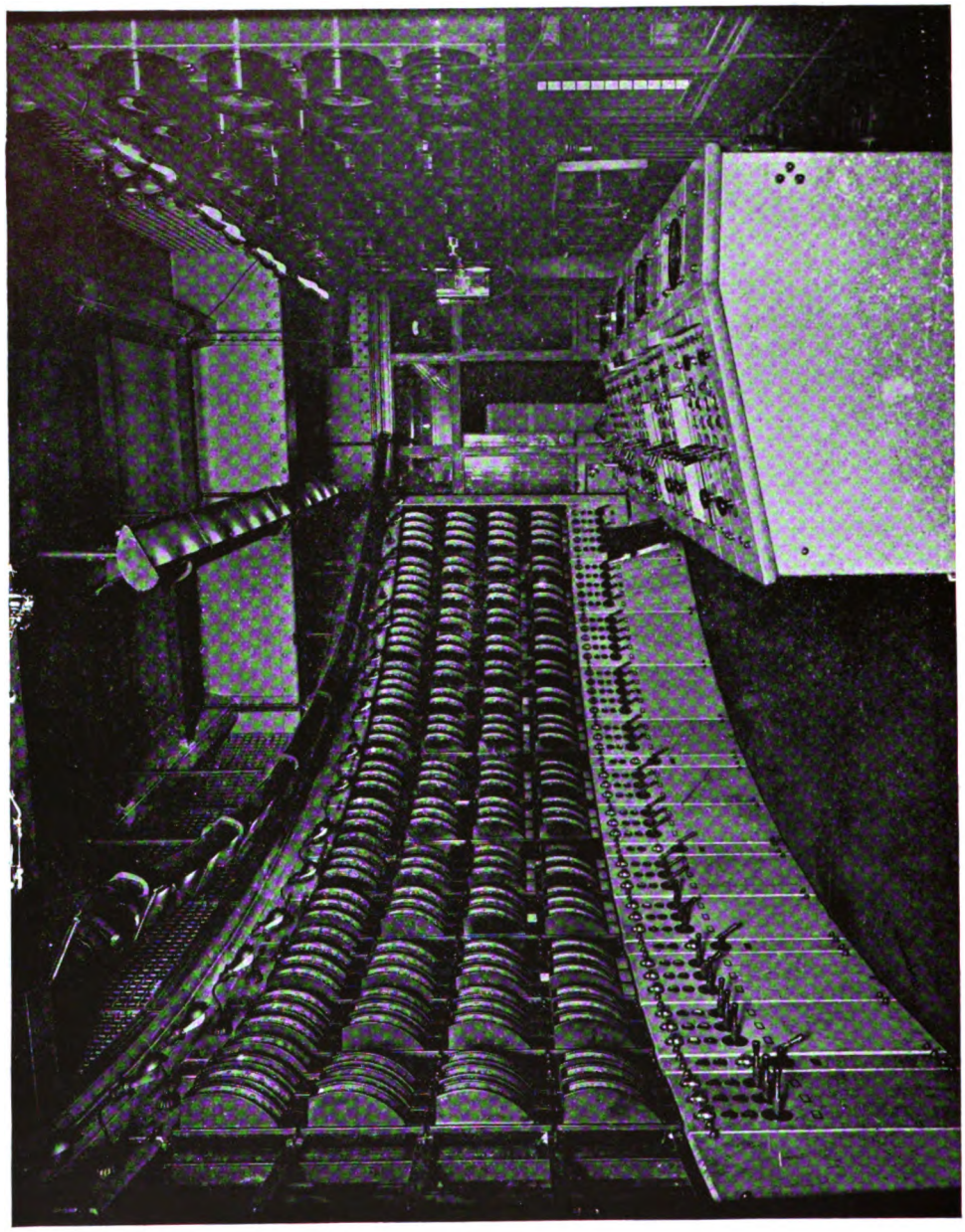


FIG. 57
High Tension Generator and Feeder Control Board, Westinghouse Equipment, Williamsburg Station

Digitized by Google

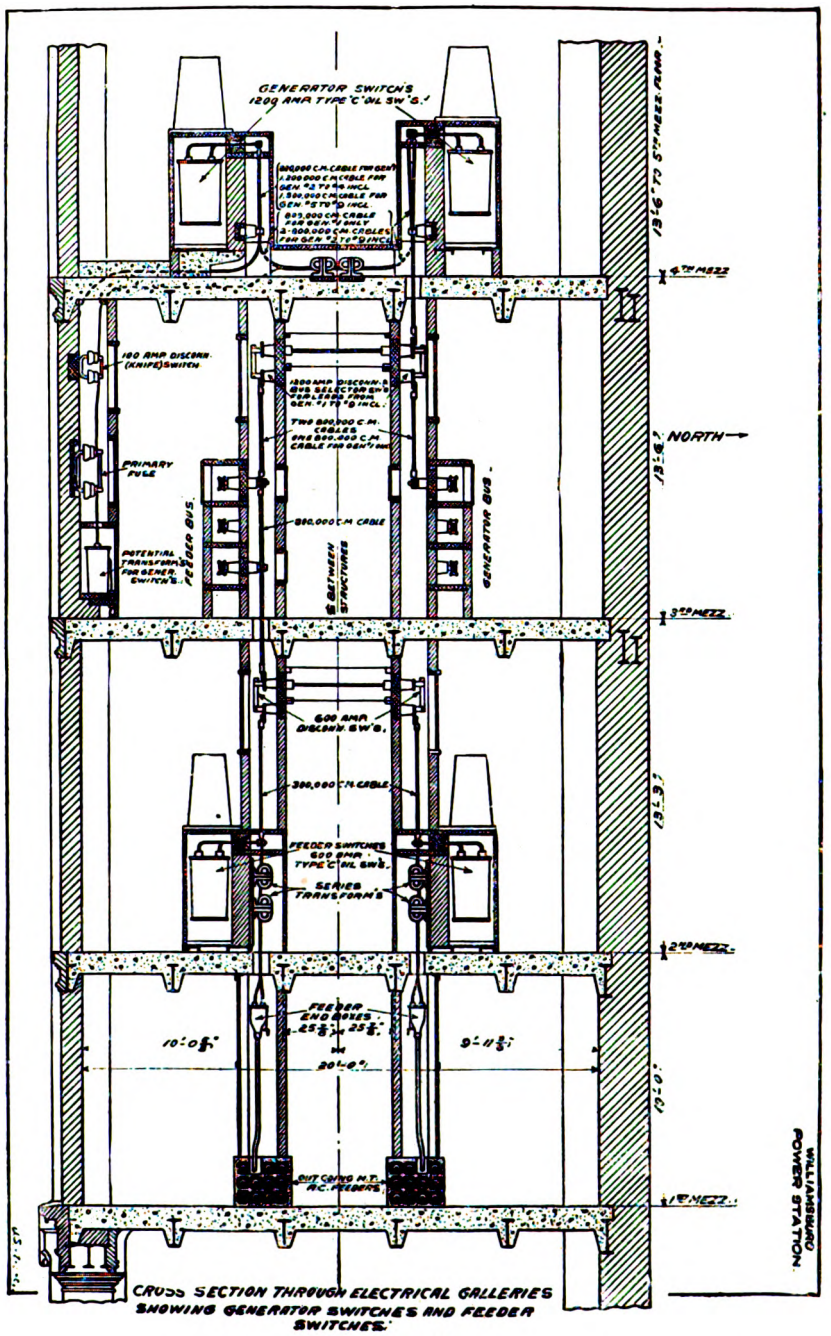


FIG. 58

Sectional View of Galleries Showing Generator Connections and Westinghouse Switches Williamsburg Station

Digitized by Google

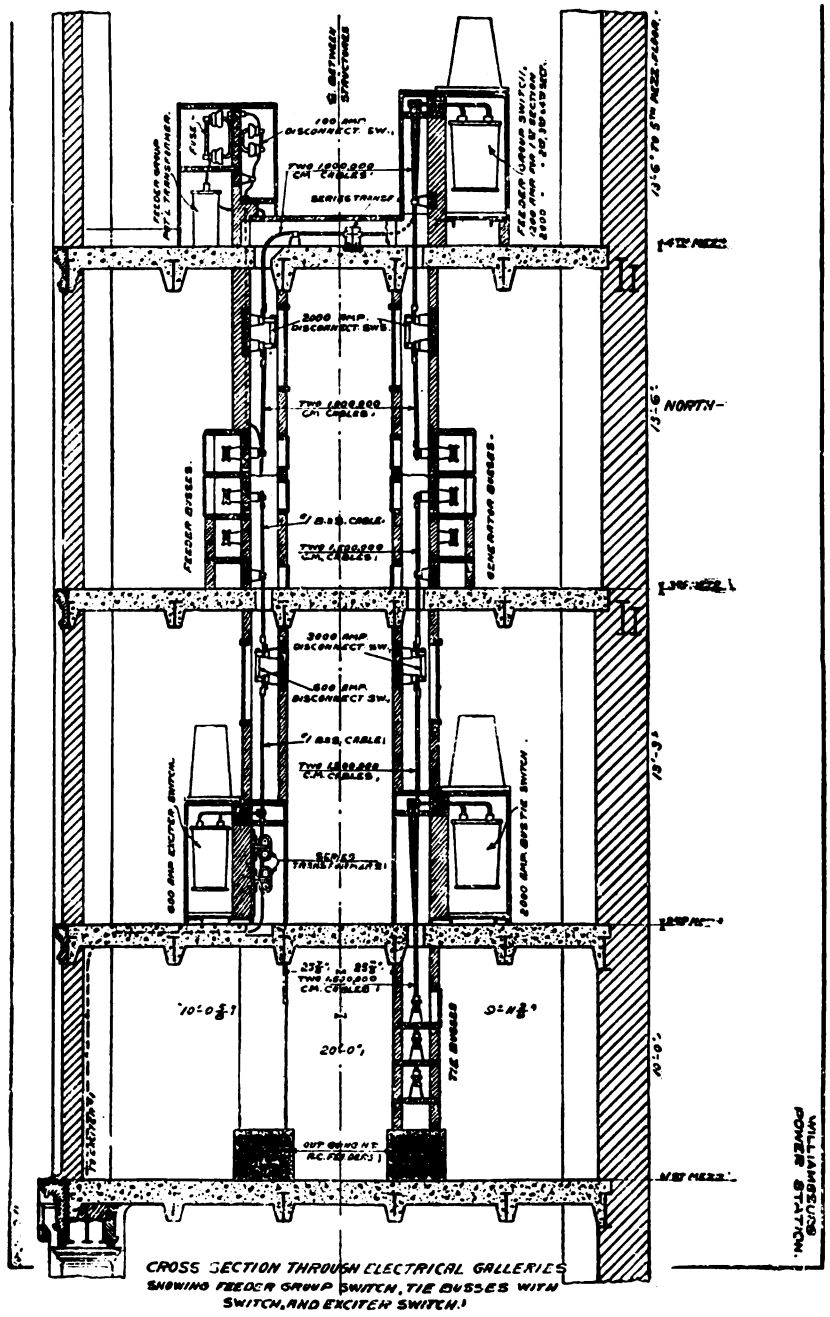


FIG. 59

Sectional View of Galleries Showing Feeder Connections Williamsburg Station

Digitized by Google

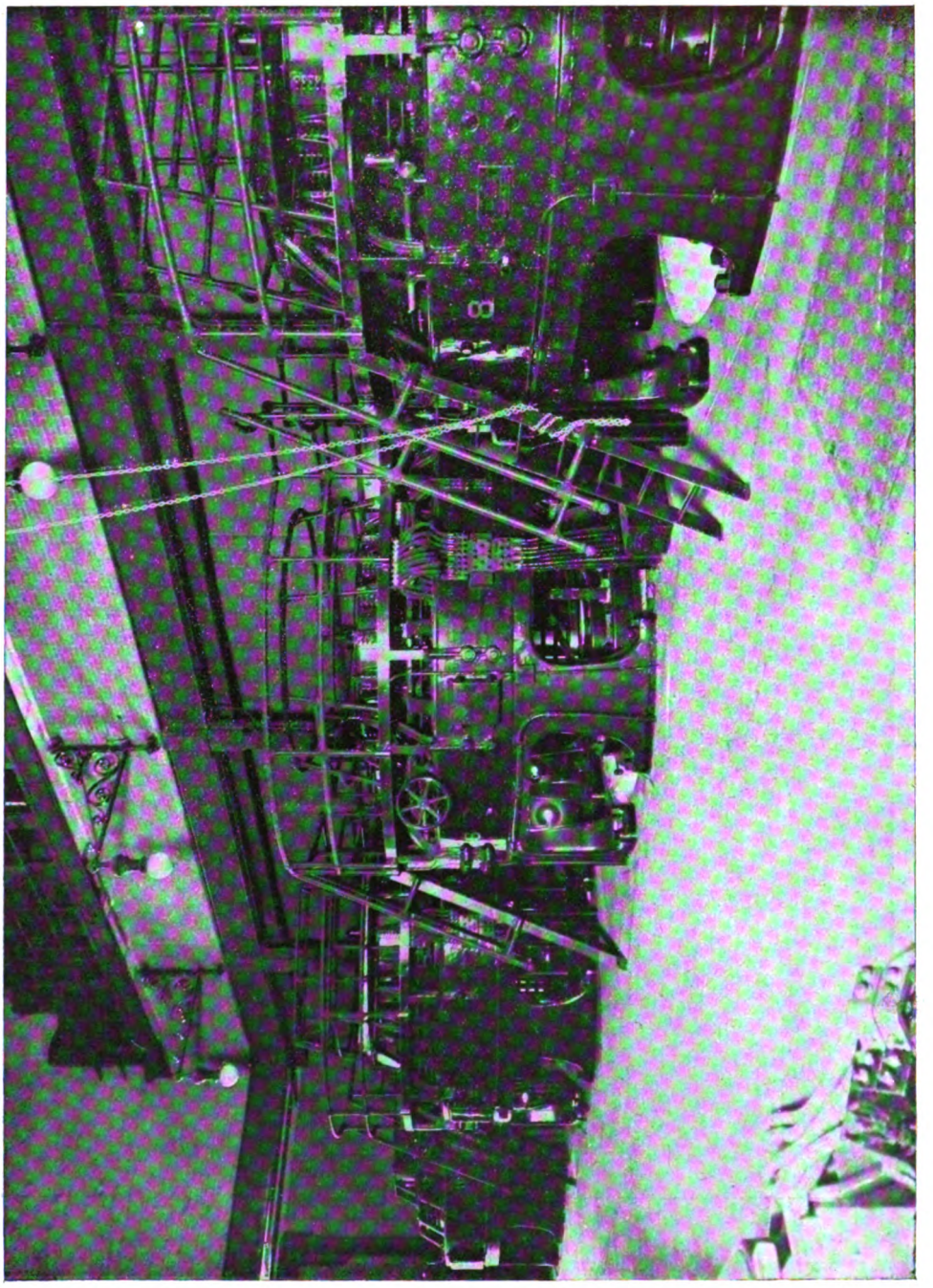


FIG. 60
View of Half of 16th Street Sub-Station, New York Edison Company, Showing Four 2500 K. W. Vertical Synchronous Converters

Digitized by Google

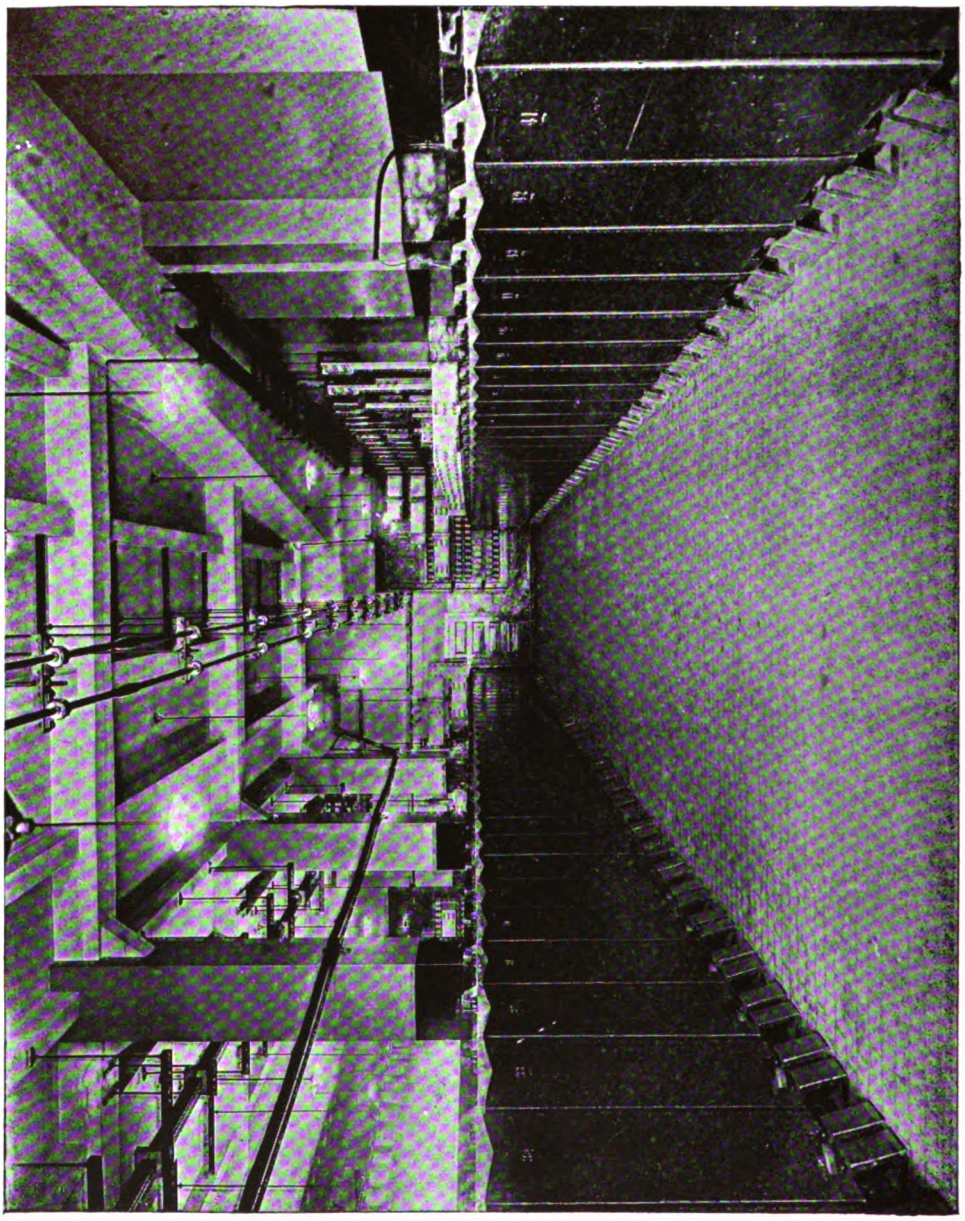


FIG. 61
Storage Battery, 3500 K. W. 1 hr., 12,000 K. W 10 mins. One-half Installed in 26th Street Sub-Station, N. Y. Edison Co. Ultimate Sub-Station Transforming Capacity 31,000 K. W. Ultimate Sub-Station Battery Capacity, 8,000 K. W. 1 hr.

Digitized by Google

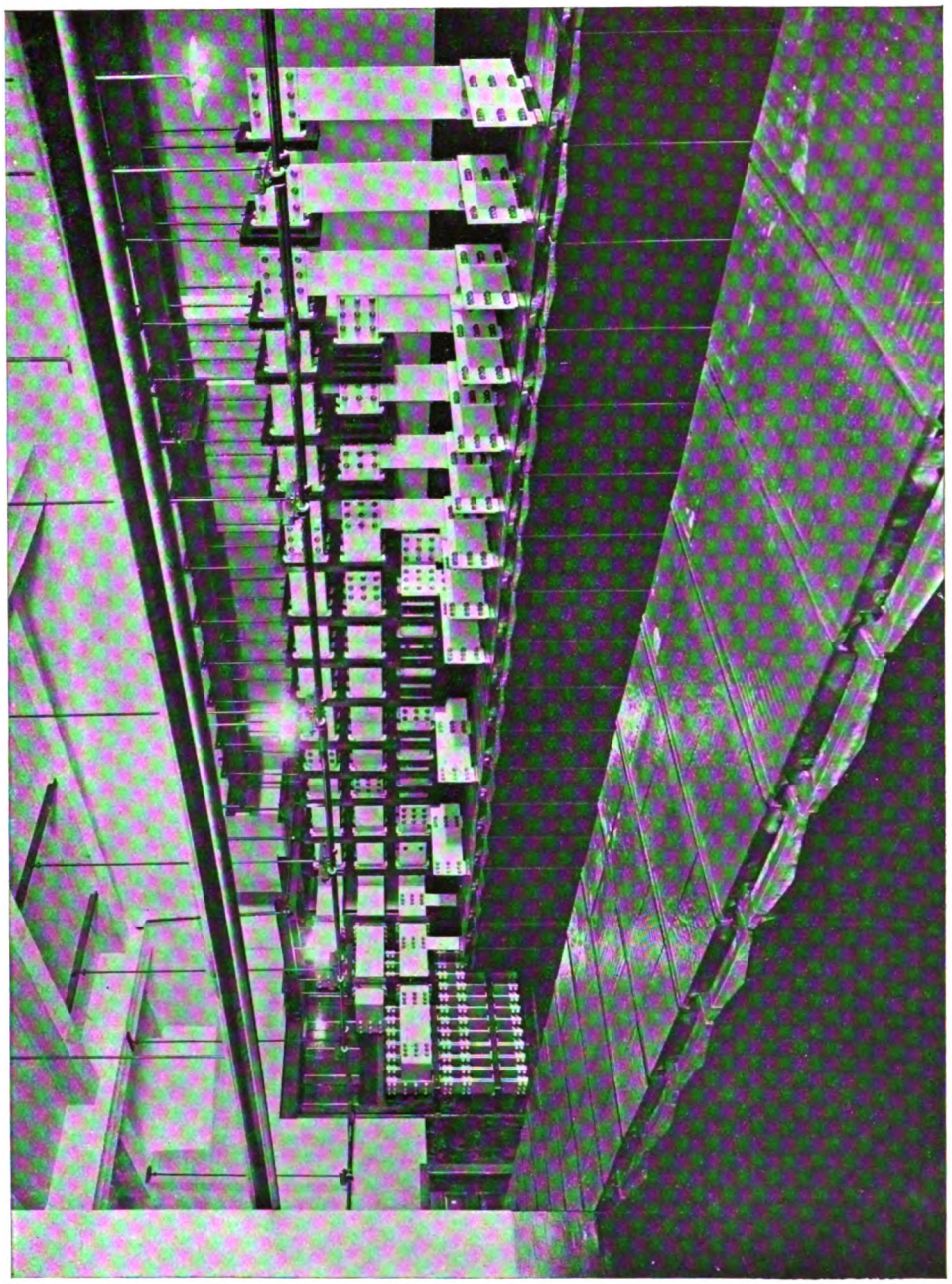


FIG. 62

End Cells and Copper Connections—3,500 K. W. 1 Hr.—Storage Battery—26th Street Sub-Station, New York Edison Company

Digitized by Google

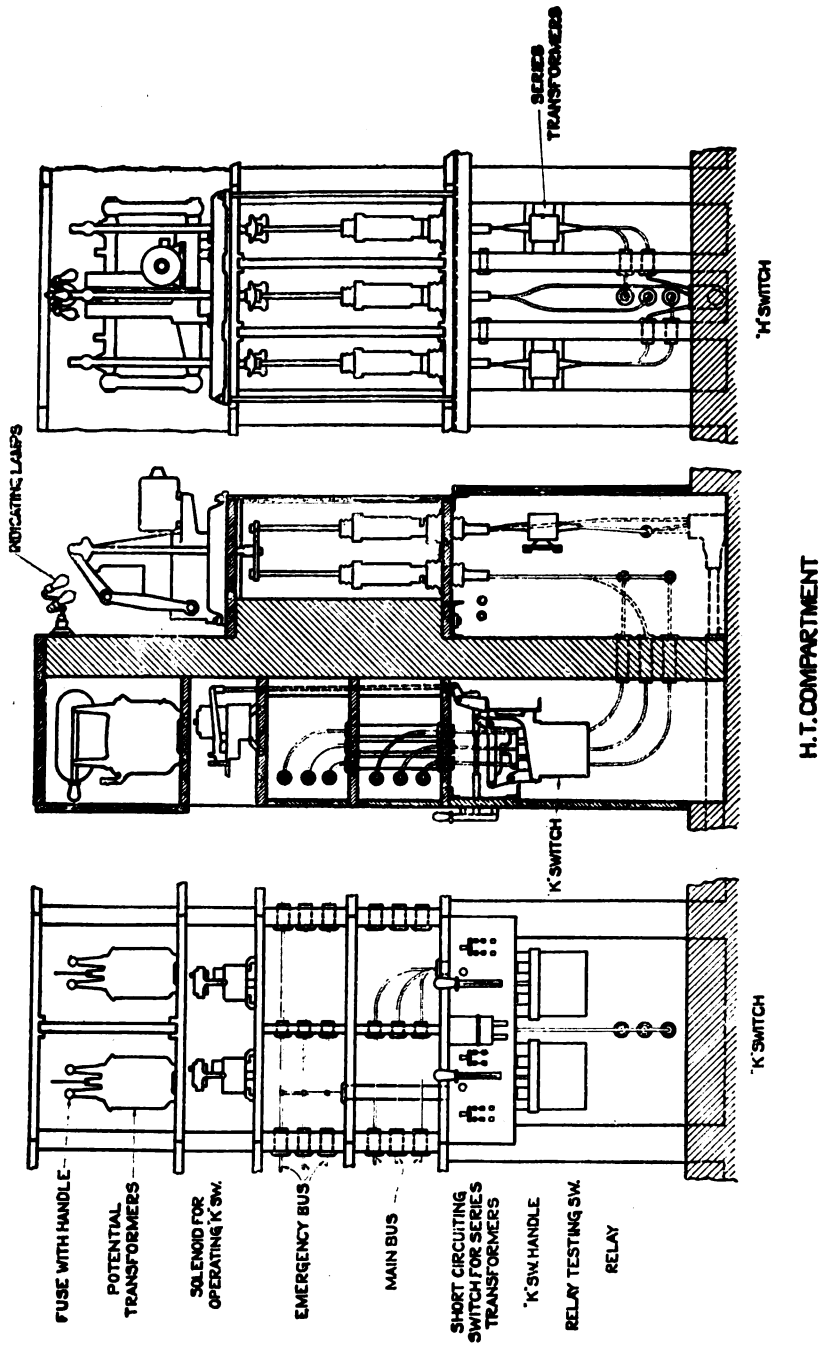


FIG. 63

Sectional Views of High Tension Compartments in Sub-Stations—G. E. Oil Switches—New York Edison Company

Digitized by Google

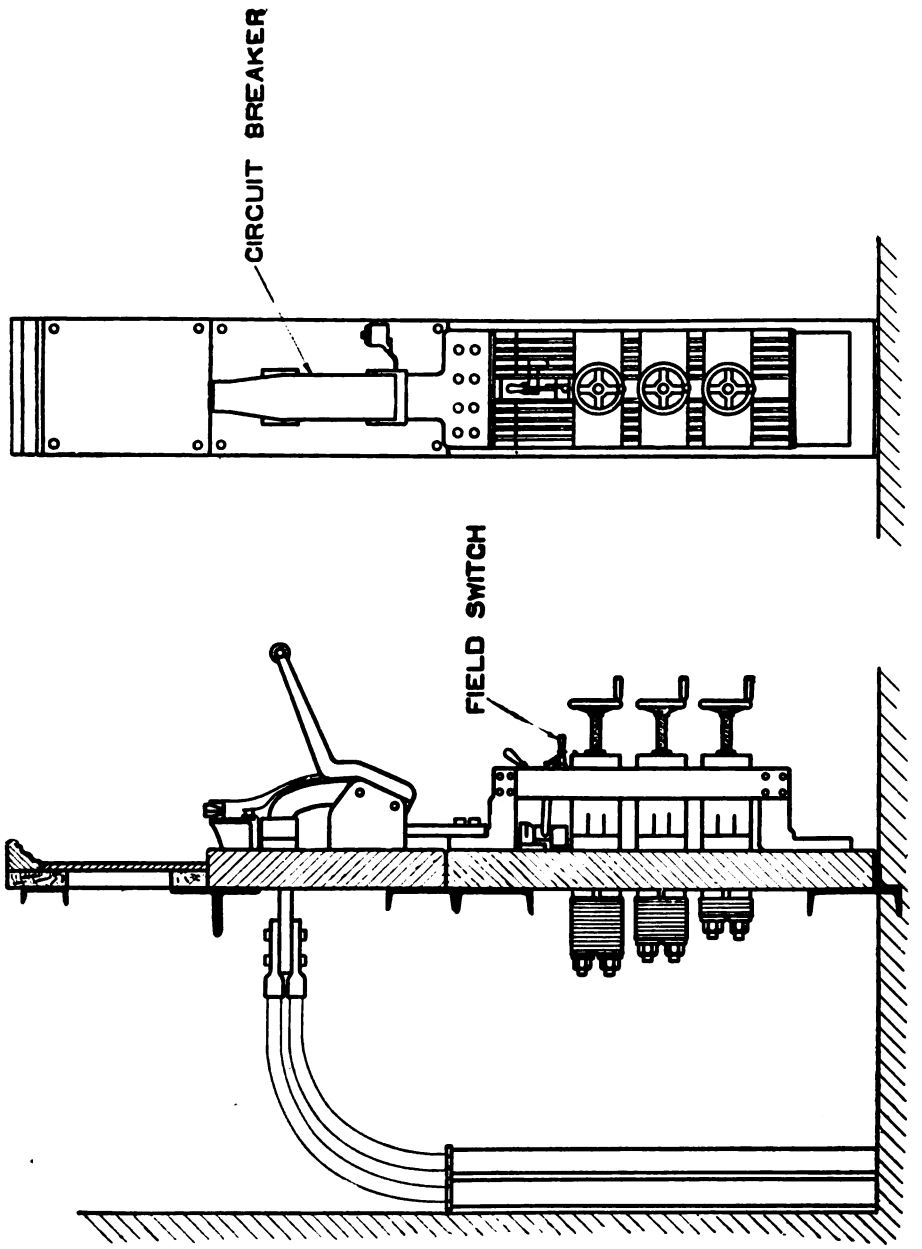


FIG. 64
Views of L. T. Switching Gear for 2,500 K. W. Synchronous Converter, New York Edison Company

Digitized by Google

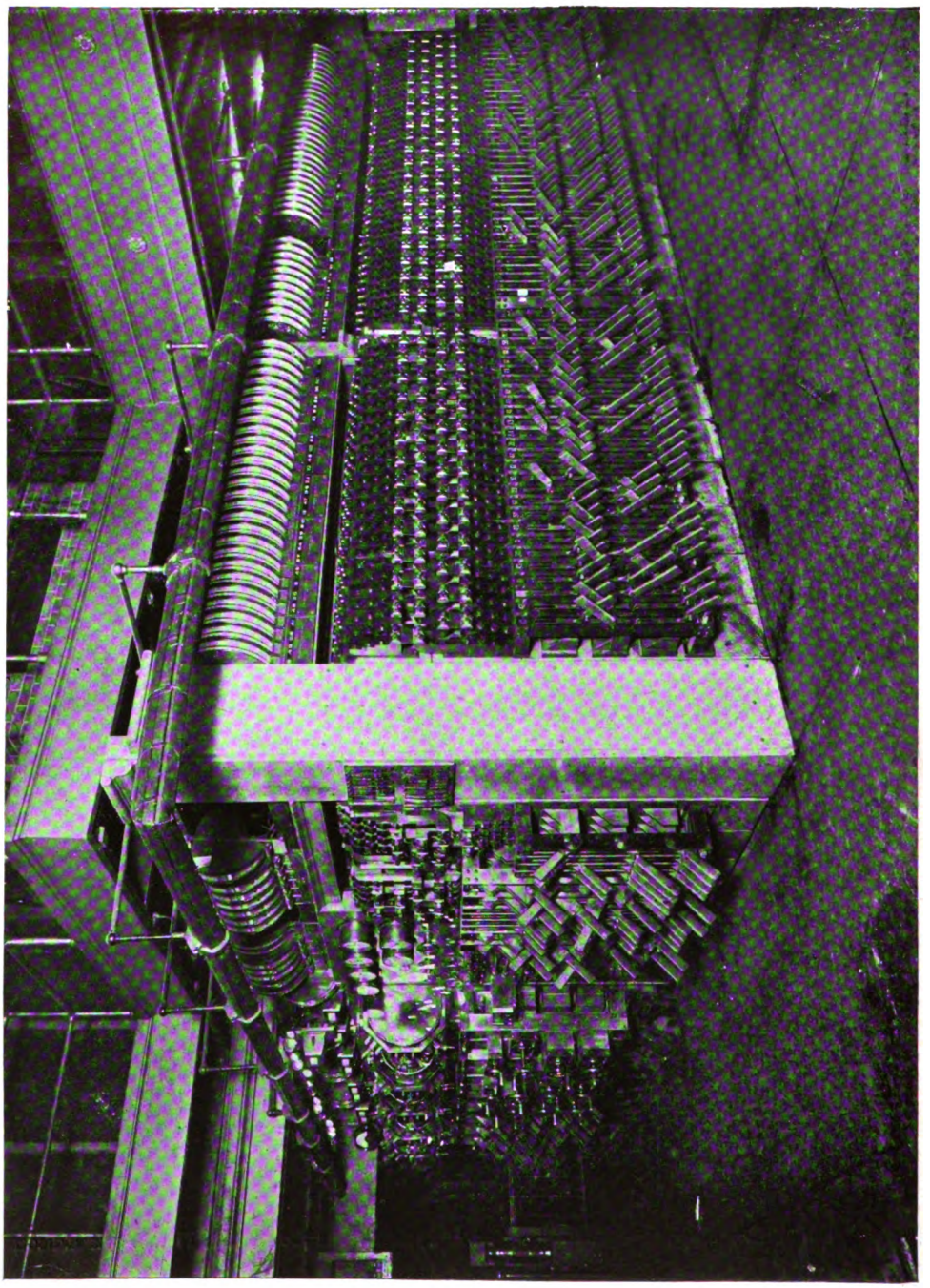


FIG. 65
View of a Low Tension Switchboard, Showing Edgewise Switches and Instruments. The New York Edison Company

Digitized by Google

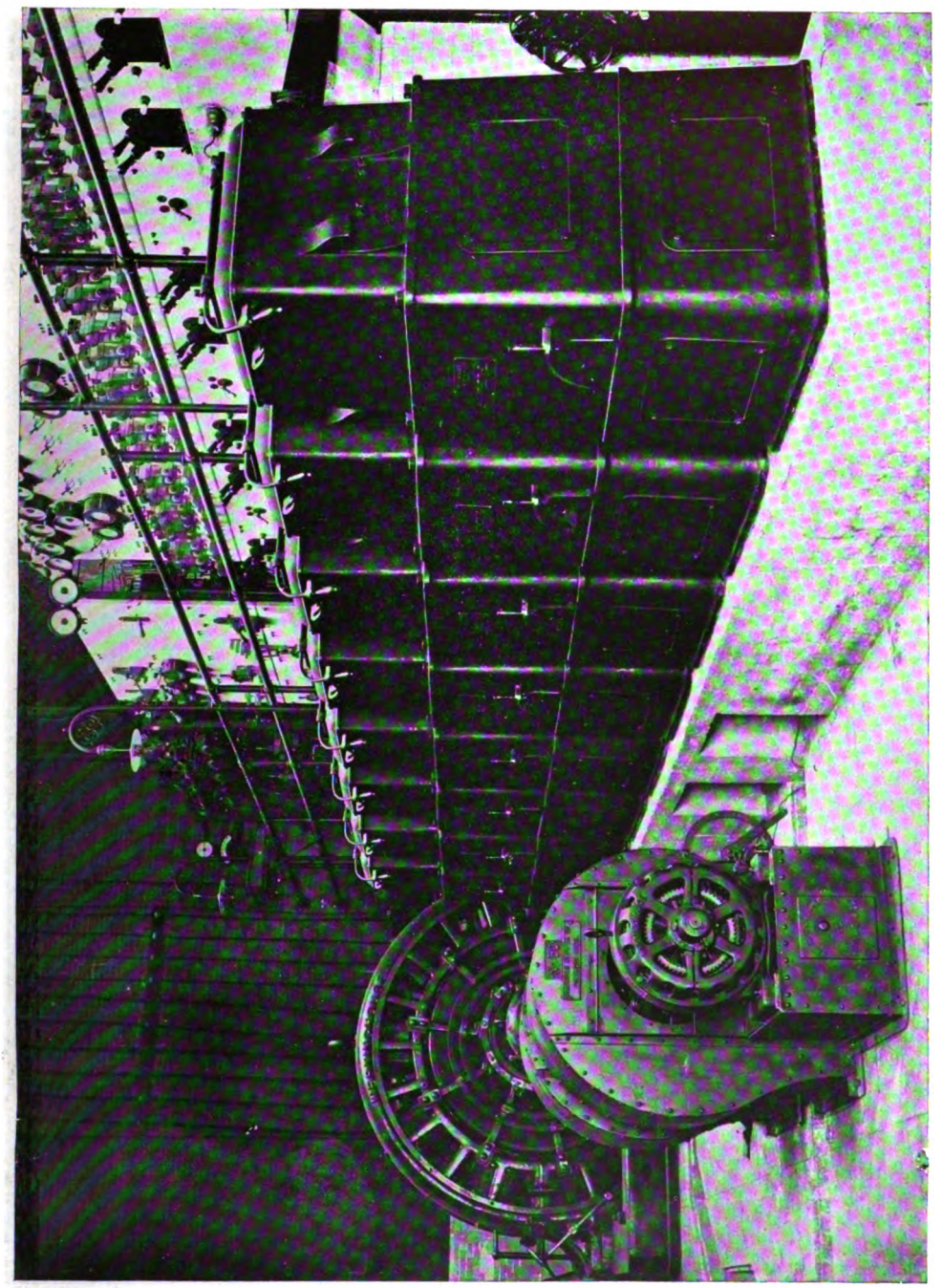


FIG. 66

View of Low Tension Alternating Current Distributing Sub-Station of the Louisville Lighting Company

Digitized by Google

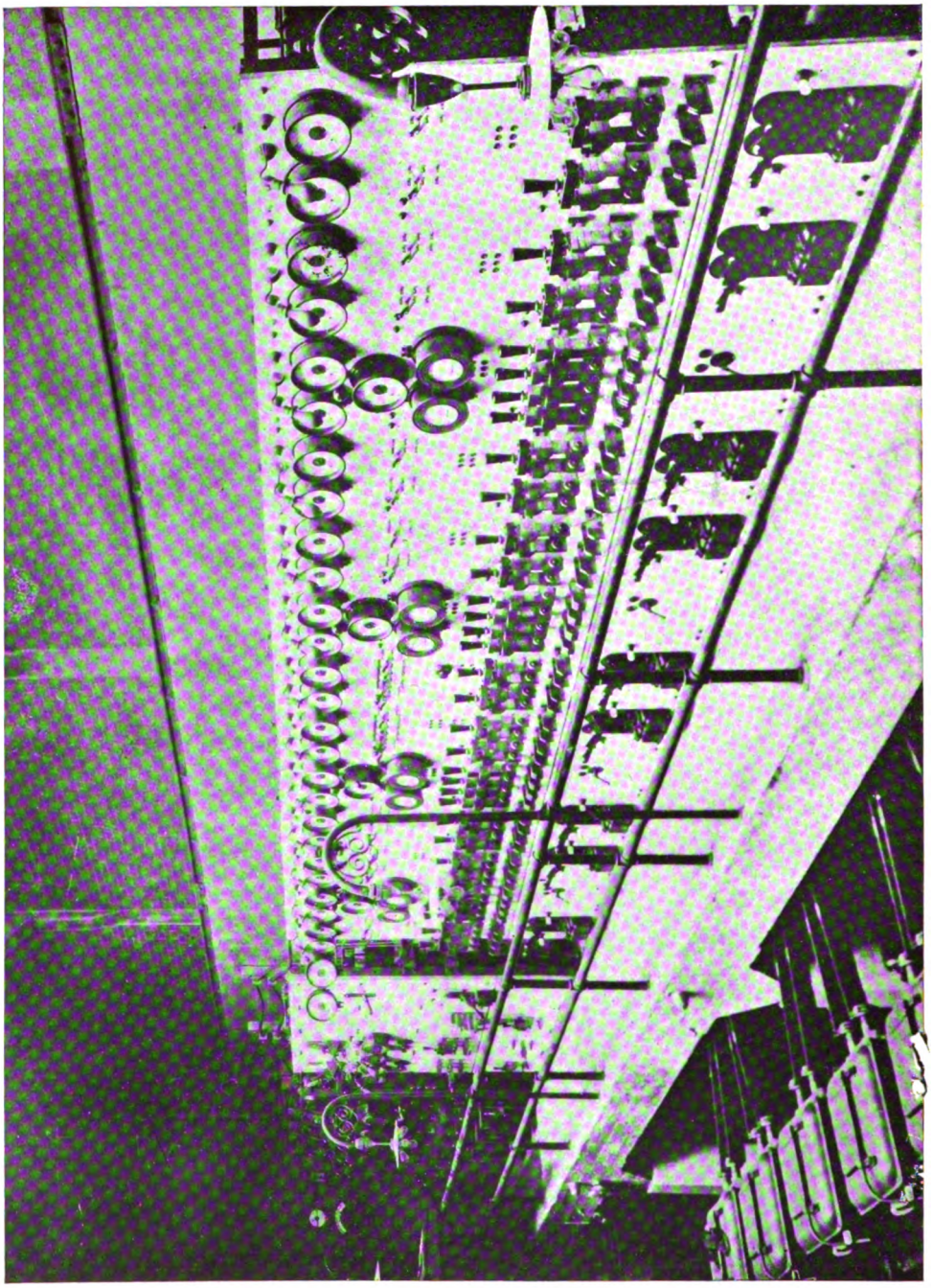


FIG. 67
Front View of A. C. Low Tension Switchboard, Louisville Sub-Station

Digitized by Google

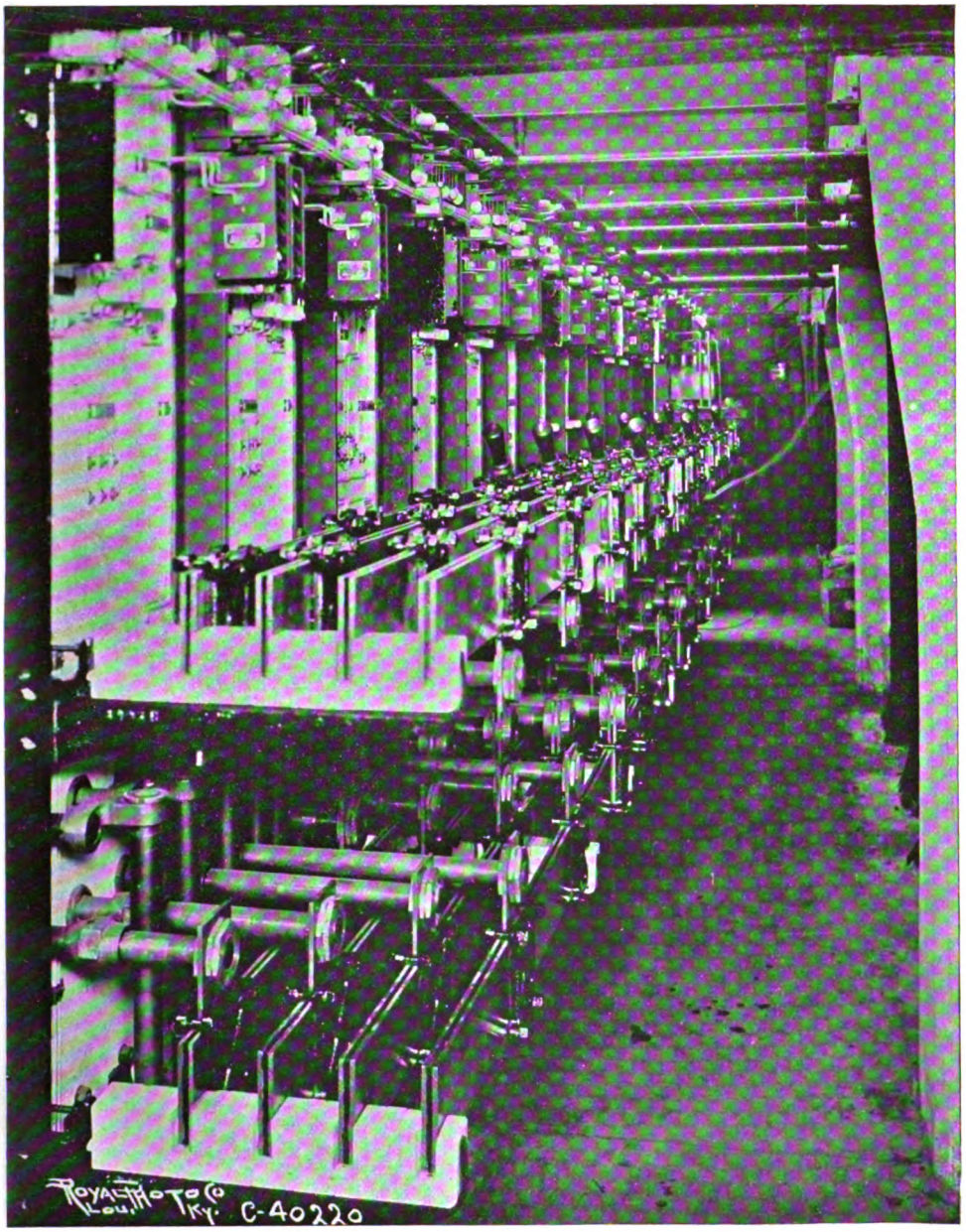


FIG. 68
Rear View of A. C. Low Tension Switchboard, Louisville Sub-Station

Digitized by Google

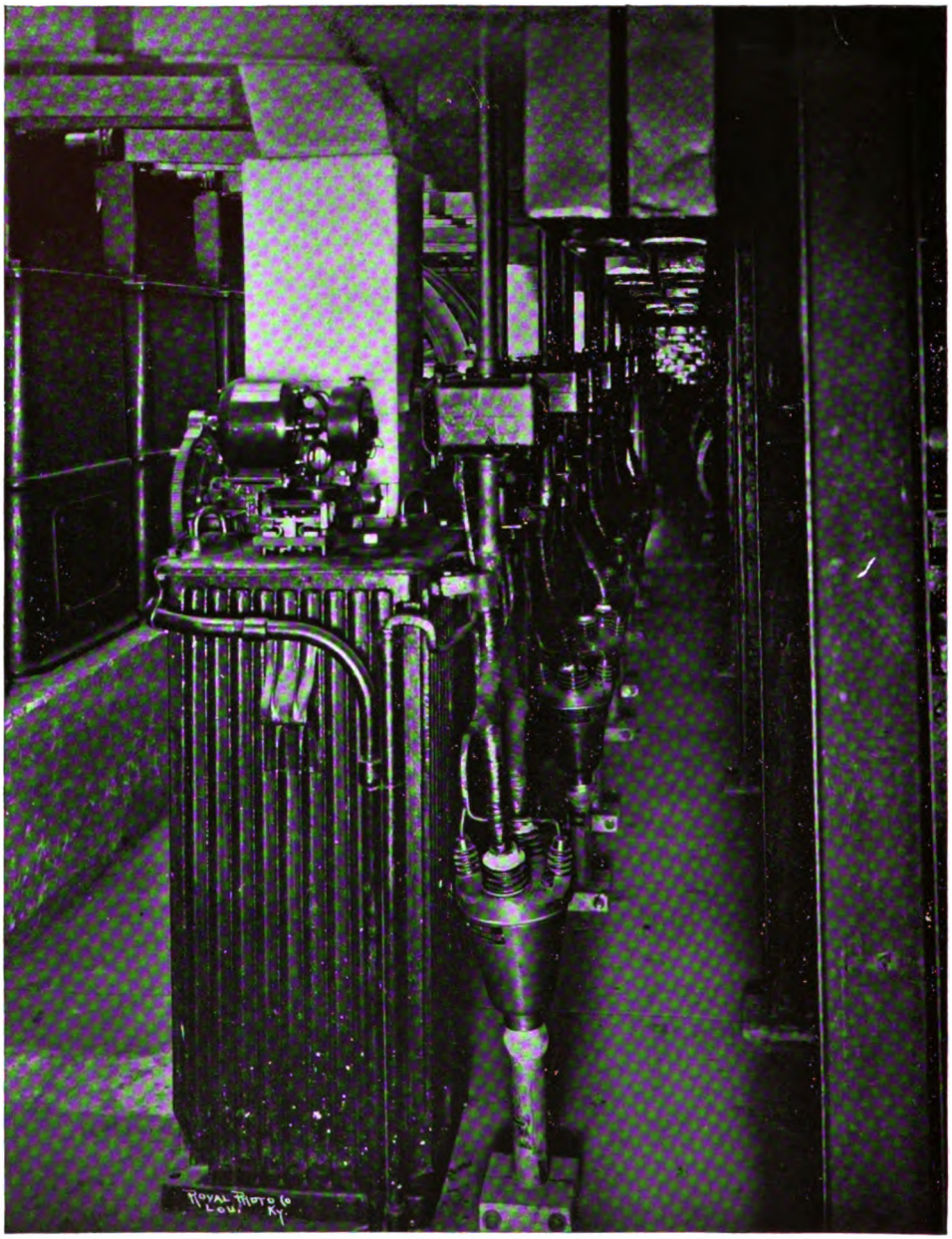


FIG. 69

A. C. Low Tension Feeder Regulator and Connections of Concentric Feeder Cables with Two Pressure Wires, Louisville Sub-Station

Digitized by Google

FIG. 70
View of Switching Gear Equipment of the 146th Street Transformer Sub-Station of the United Electric Light & Power Company
Distributing at 3,000-Volts Underground—Westinghouse Oil Switches

Digitized by Google

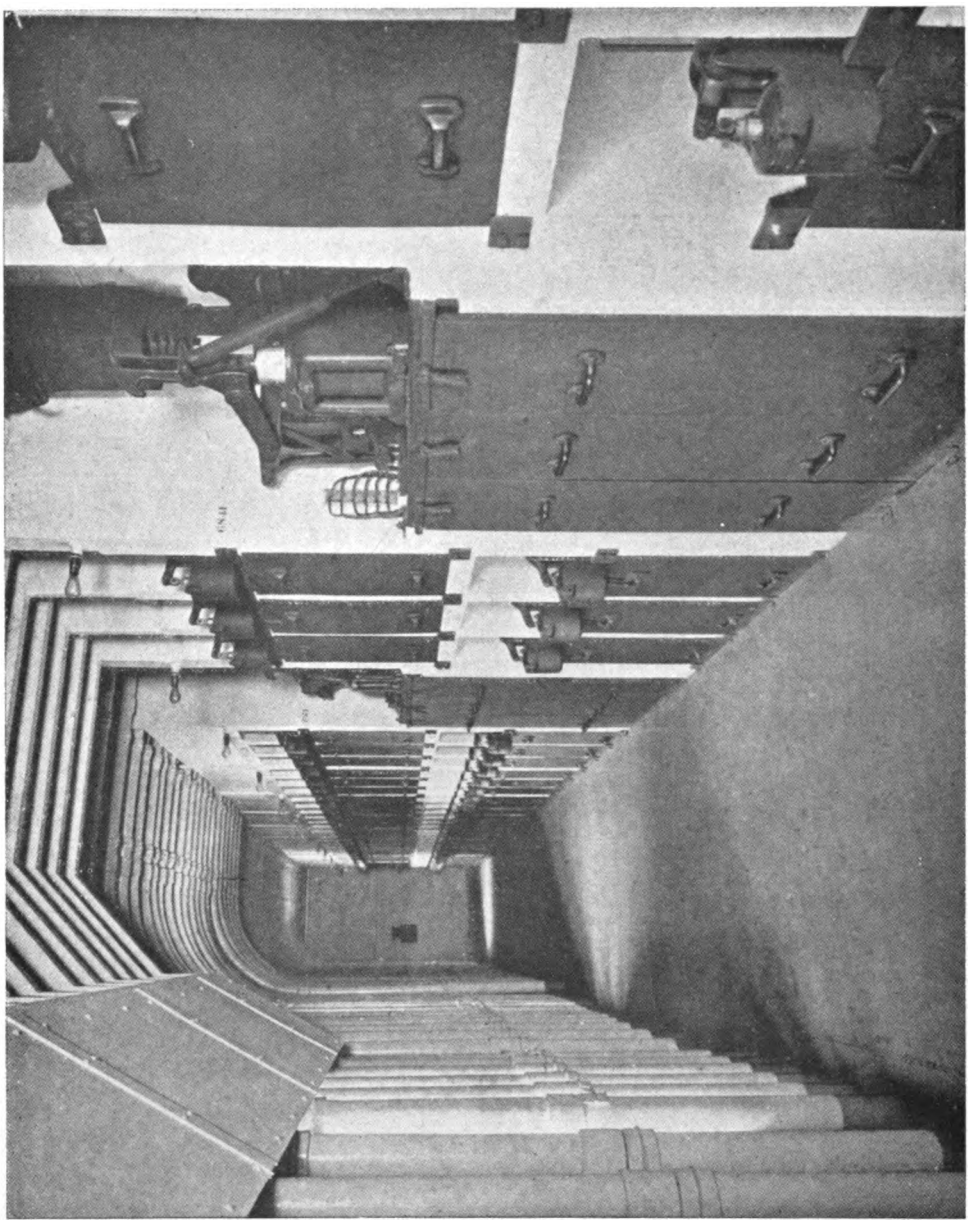


FIG. 71
Switching Gear and Outgoing Feeder-Board, 146th Street Station

Digitized by Google

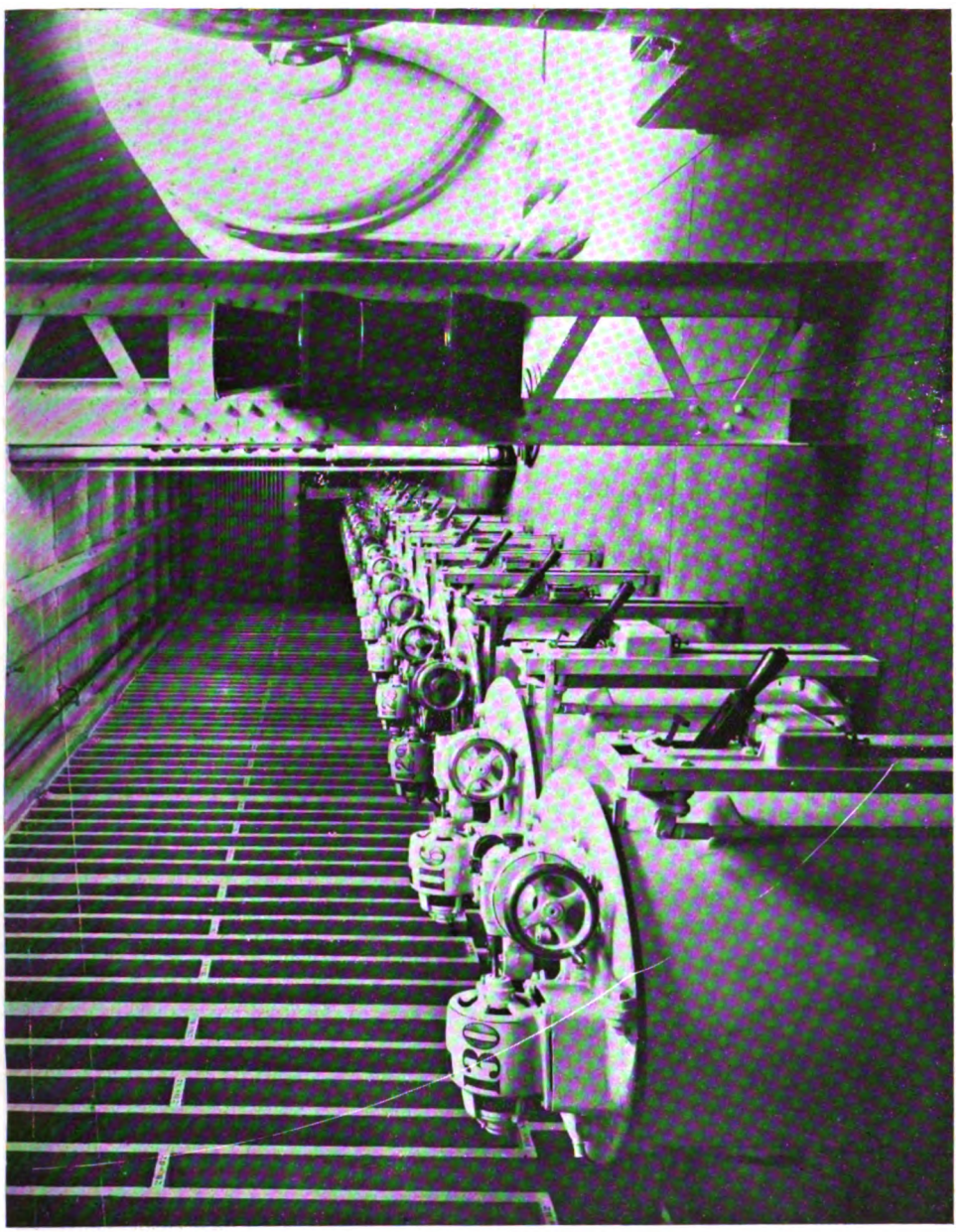


FIG. 72
View of Automatic Induction Feeder Regulators (Westinghouse Type), 146th Street Sub-Station

Digitized by Google

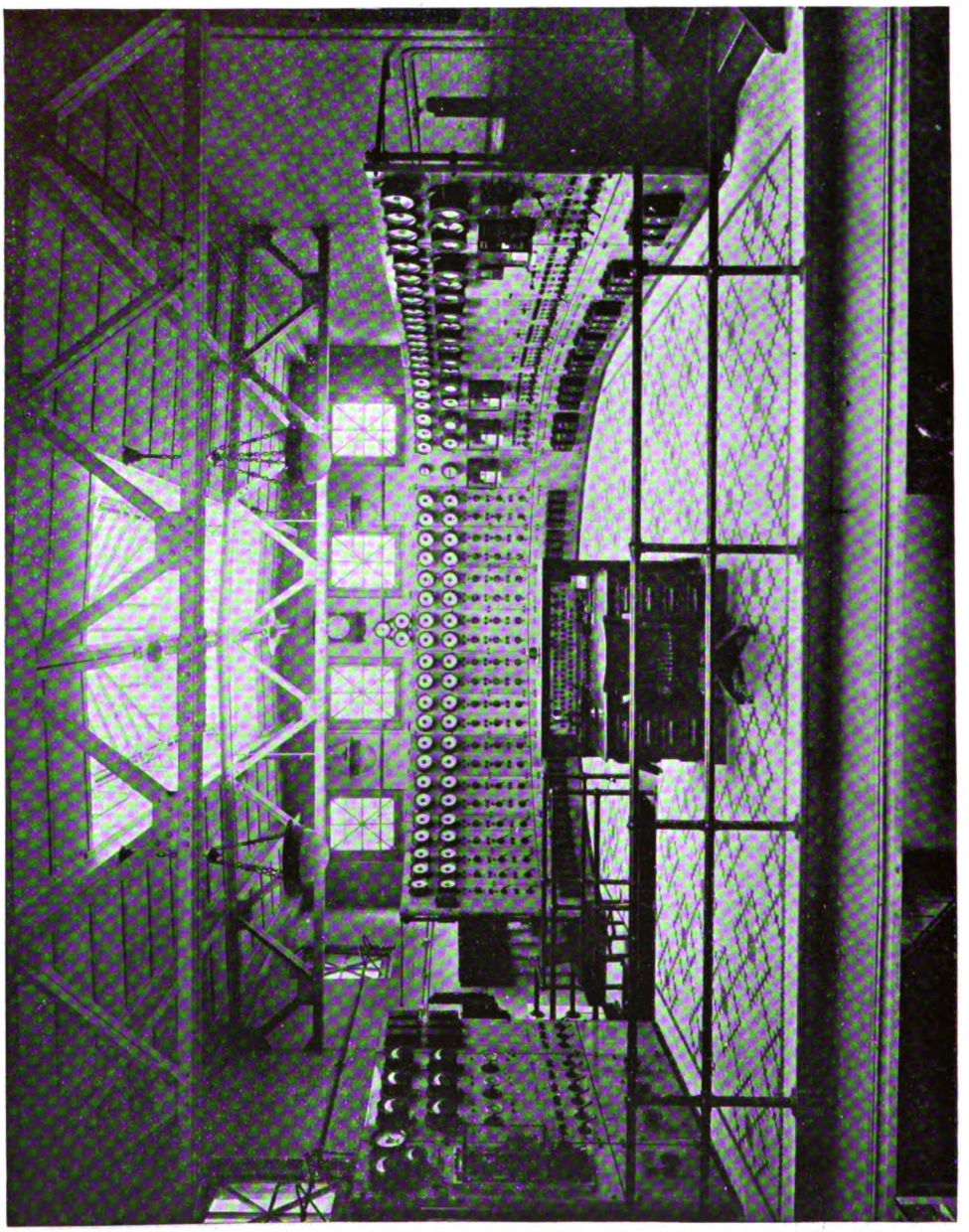


FIG. 73
View of Control Board of 146th Street Sub-Station, Westinghouse Equipment

Digitized by Google

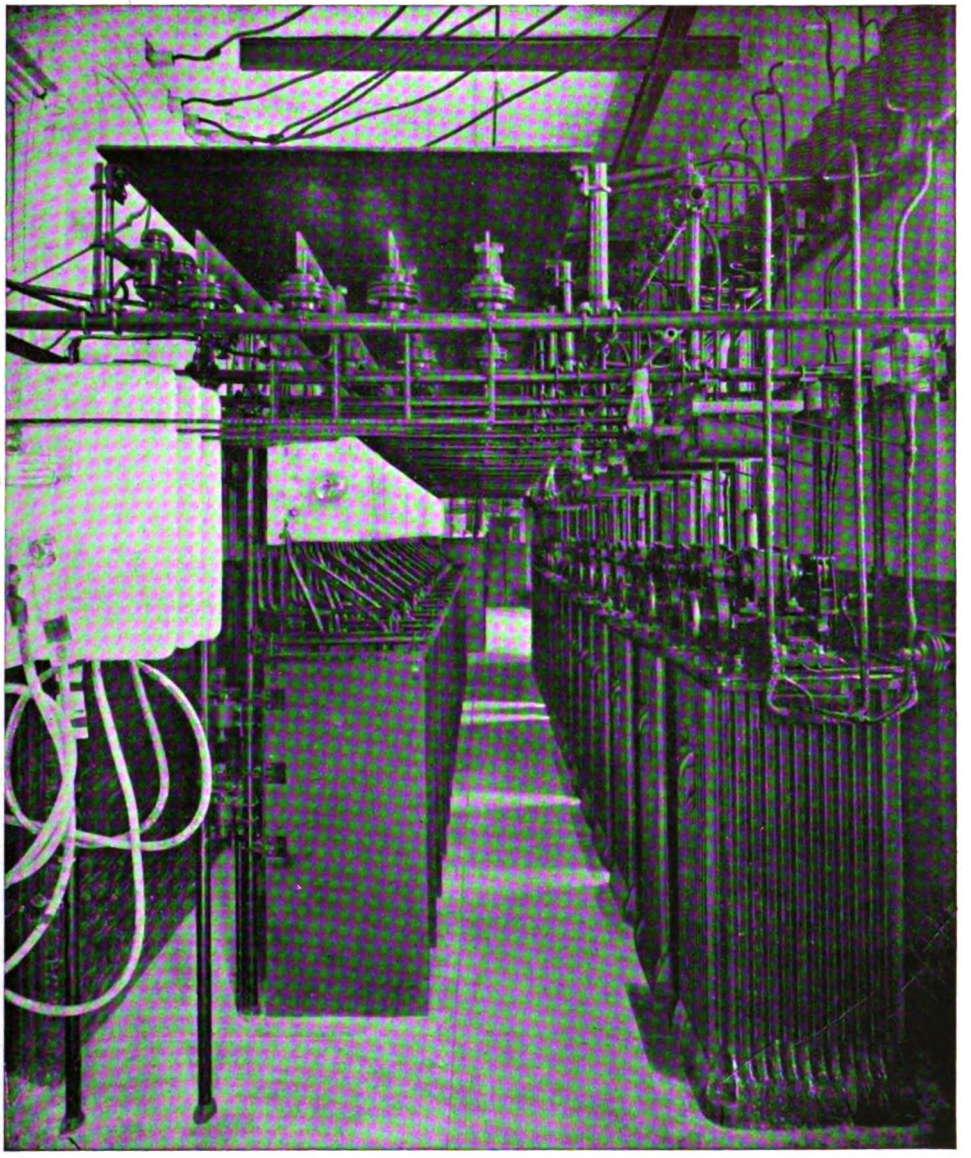


FIG. 74
View of Installation of Automatic Feeder Regulators (G. E. Type), Overhead Distribution, Albany, N. Y.

Digitized by Google

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Le rapport comprend deux parties principales consacrées aux questions économiques et commerciales, et trois appendices illustrant les détails de construction et de fonctionnement.

La première partie *traite des transports d'énergie à grande distance et analyse quatre facteurs principaux qui influent sur le choix de la tension, soit les suivants:*

1. Frais d'installation des usines génératrices et des stations de transformation. — *La comparaison faite par l'auteur regarde seulement les éléments, transformateurs, tableaux de distribution, paratoudres, bâtiments, qui subissent l'influence de la tension. Les frais de ces éléments par K. W. de puissance installée, pour diverses puissances et pour deux voltages différents (soit 110,000 et 44,000 volts) sont les suivants:*

Installations (*à l'intérieur*).	Couplage	110,000 Volts	44,000 Volts	Difference
Usines génératrices.		Frcs	Frcs	Frcs
10,000 K.W. et 2 lignes	triangle	38.40	16.80	21.60
20,000 K.W. et 4 lignes	étoile	32.65	20.75	11.90
30,000 K.W. et 2 lignes	triangle	17.30	9.00	8.30
40,000 K.W. et 4 lignes	étoile	20.70	13.15	7.55
60,000 K.W. et 4 lignes	triangle	15.45	7.75	7.70
Stations de transformation.				
40,000 K.W. et 2 lignes	étoile	18.05	12.35	5.70
20,000 K.W. et 2 lignes	étoile	20.85	13.80	7.05
5,000 K.W. et 2 lignes	étoile	37.25	23.20	14.05

Pour les installations faites au dehors, *les frais correspondants n'offrent aucun avantage sur celles faites à l'intérieur.*

2. Prix des lignes de transport. — *Une comparaison de deux lignes à double circuit pour 110,000 et 44,000 volts donne des prix de*

Digitized by Google

Frcs 15471 et de Frcs 18976, par kilomètre, la différence de Frcs 3505 étant en faveur de la ligne à 110,000 volts.

3. Frais d'installation *pour la puissance d'usine génératrice nécessaire pour couvrir les pertes de transmission à l'instant de la charge maxima. — L'auteur conseille d'appliquer dans le calcul une majoration de prix égale à la moitié du coût moyen par K. W. de puissance totale. L'auteur insiste aussi sur l'importance du réglage de la tension en ligne et sur les limitations dues aux pertes par " effet de dispersion „.*

4. Valeur de la sécurité relative de la continuité du service. — *Si l'on excepte les accidents qui proviennent des causes extérieures, lesquels sont les plus nombreux et sont communs à toutes les valeurs de la tension, les systèmes à tension très élevée résistent mieux aux perturbations provoquées par les surélévations et les phénomènes atmosphériques.*

Conclusions — Première partie.

a) Le choix de la tension dépendra surtout de la différence entre l'économie *dans les lignes et dans les pertes de transmission réalisée avec les tensions plus élevées et* l'accroissement du coût *des machines et des appareils de l'usine génératrice et des stations de transformation. Cette majoration de prix devient naturellement d'autant plus considérable que le nombre des stations de transformation augmente et que les puissances transformées sont petites. Par conséquent si les points d'embranchement de la canalisation principale sont nombreux, il peut arriver que les tensions très élevées soient impraticables au point de vue de l'economie.*

b) Les systèmes à tensions très élevées présentent au moins autant de sécurité que les systèmes à tensions plus basses; ils possèdent des avantages matériels en ce qui concerne les surtensions momentanées d'origine interne ou atmosphérique.

c) L'emploi d'une isolation propre aux tensions très élevées dans les canalisations et dans les appareils des systèmes à tension modérée augmentera le coefficient de sécurité et, par conséquent, est à recommander pour les installations importantes.

La deuxième partie *traite de la tension de distribution pour stations réceptrices et pour usines génératrices à vapeur et analyse les tensions* standard *de 6,600, 11,000 et 13,200 volts.*

Digitized by Google

Les frais d'installation des usines génératrices ne sont pas très différents. Par contre la différence est considérable en ce qui regarde les frais d'installation des câbles et les pertes relatives de puissance et d'énergie dans la canalisation.

Par exemple si l'on compare des canalisations souterraines à 11,000 et 13,200 volts avec un système typique à 6,600 volts comme celui de la New York Edison, on constate que, en tenant compte des prix relatifs des câbles, de la puissance nécessaire pour compenser les pertes plus grandes du système à 6,600 volts, et, enfin, des pertes d'énergie, il serait possible de réaliser une économie annuelle de Frcs 0,90 par K.W. de charge maxima dans le cas de 11,000 volts et de Frcs 1,65 dans le cas de 13,200 volts. La limitation du réglage de la tension en ligne peut rendre la comparaison encore plus favorable aux tensions plus élevées. L'emploi de transformateurs survolteurs pour les feeders de grande longueur est à recommander surtout si ces feeders sont aériens au moins pour une part.

Les systèmes à tensions moins élevées résistent mieux aux surtensions. L'auteur discute aussi l'emploi d'autotransformateurs et de réactances extérieures avec des génératrices à grande vitesse.

Conclusions — Deuxième partie. — *Dans les stations réceptrices des transports à grande distance et dans les usines génératrices à vapeur pour distribution locale, l'influence de la tension de distribution sur les frais d'installation n'est pas considérable. Par contre, le choix de la tension de distribution dépend des considérations suivantes:*

a) Frais comparatifs d'établissement des câbles. Ces frais dépendent de la longueur moyenne des feeders, du réseau principal (et des limitations imposées par le service au réglage de la tension en ligne) et aussi de la possibilité d'employer des transformateurs survolteurs dans les feeders de grande longueur.

b) Pertes relatives de puissance et d'énergie dans la canalisation. L'économie des pertes d'énergie n'a d'importance que pour les installations à vapeur et dépendra du coefficient de charge *du système.*

c) Les enroulements des génératrices à grande vitesse doivent être à basse tension si l'on veut avoir des coefficients de sécurité diélectrique et mécanique élevés. L'emploi d'autotransformateurs à réactance élevée ou de réactances extérieures augmente la sécurité du système.

d) La sécurité supérieure des systèmes à tensions modérées a une valeur spéciale pour les systèmes importants de distribution de puissance et lumière, eu égard aux pertes commerciales plus grandes que ces

Digitized by Google

systèmes doivent subir si le service est sujet même à des interruptions momentanées.

APPENDICES.

L'appendice I donne des descriptions succintes accompagnées de plusieurs gravures d'interrupteurs et d'appareils pour tensions très élevées et de dessins typiques d'usines et de stations de transformation pour 110,000, 80,000 et 44,000 volts.

L'appendice II donne des sommaires du fonctionnement pratique des systèmes à haute tension; plusieurs systèmes à 100,000 volts sont mentionnés.

L'appendice III est un précis de la pratique aux États-Unis en ce qui concerne les systèmes de distribution à courants continus ou alternatifs et contient des illustrations d'usines génératrices, stations de transformation et tableaux de distribution, pour divers services.

Digitized by Google

COMMERCIAL ELECTRICAL APPARATUS

for 100,000 volt service.

STEPHEN Q. HAYES (Pittsburg Pa. U. S. A.).

The main value of a technical paper presented before a meeting of engineers lies in the information contained in the paper or brought out in its discussion. Consequently, it has been the writer's aim to give in this paper as much general information relative to a very broad subject as can be compressed into an article of moderate length. This condensation makes it necessary to touch but lightly on certain subjects and completely pass over others that may be of vital interest to some engineers.

Electrical engineers are familiar with commercial electrical apparatus for comparatively moderate voltages, so this paper refers to apparatus for voltages of 100,000 or above. To eliminate theoretical conditions and appliances, this paper confines itself to commercial electrical apparatus already operating, built or designed for actual or proposed power transmission systems, with which the writer is personally familiar. In passing it might be stated that the apparatus in question have all been built or designed by a company that now has approximately 1,000,000 K. W. of transformers in actual operating service at voltages of 40,000 volts and above.

Digitized by Google

The general trend of electrical pressure for power transmission service is ever higher and higher and, while there are at present comparatively few plants in actual service or designed for operation at 100,000 volts or above, their number is increasing continuously, as the market for electrical power grows, nearby water powers are all utilized, and the distance from a market to a suitable source of power increases.

While high voltage direct current has been used, to a slight extent, for power transmission, practically all high voltage systems of any importance in the United States use three phase alternating current, and the success of this system depends primarily on the following apparatus:

Transformers for developing and using the high tension, *Terminals* suitable for high tension apparatus, *Circuit Breakers* and switching appliances, for controlling the high tension, *Lightning Arresters* and protective devices for the high tension, *Station arrangements* suitable for high tension installation, *Transmission lines* for the high tension.

It is not the intention in this paper to go deeply into the theory of the design of transformers, switching appliances, protective devices, transmission lines, etc., but it is the intention to illustrate and describe some of the recent designs to show the commercial feasibility of high voltage power-transmission, and it is hoped that the information can be utilized to advantage on systems of lower voltages than those to which the paper is confined.

Transformers:

Transformers as well as other electrical apparatus develop heat during their operation, and various means have been adopted for dissipating this heat. Owing to the difficulty of securing satisfactory insulation, without the use of oil for voltages of 100,000 and above, all such transformers are made oil-immersed and are arranged for natural oil cooling or artificial oil cooling, depending on their size and other considerations.

Natural oil cooling takes place when a transformer is immersed in oil and provided with a case having a sufficient radiating surface to dissipate the heat brought to it by the oil. Transformers of this type have numerous ducts extending through the openings in the iron from one end of the coils to

Digitized by Google

the other, and similar ducts between the laminations to permit a circulation of oil throughout the interior of the transformer. Using cases with plain boiler iron tanks or deep corrugations, the maximum size of transformers, that can be made of self cooling type is about 1000 KVA., but by adopting the tubular construction illustrated in Fig. 1, transformers can be made self cooling up to 3500 KVA. or even larger.

For still larger sizes artificial oil cooling is adopted and the method in general use for cooling the oil, is to place one or more coils of seamless tubing under the oil in the top of the transformer case near the walls of the tanks and to circulate water through these coils, to remove the heat from the oil and to promote the circulation of the oil. The limit of size for transformers is largely a question of shipping facilities or the building up of the transformer at destination, transformers having been designed in capacities up to 14,000 KVA.

The question of relative advantages of 3-phase or single-phase transformers may be summed up by stating that 3-phase transformers of moderate size, when compared with single-phase units of the same total capacity, have the advantage of lower costs, higher efficiency, smaller floor space, less weight, simpler wiring, reduced freight and erection charges, while the main disadvantages are the greater cost of spare units and repairs. Allowing a spare unit in each case for one or two circuits, single-phase units have the advantage in price of transformers, while for three or more circuits, the 3-phase units have the advantage.

Where the capacity, however, of the 3-phase transformer or a bank of single-phase transformers is in the neighborhood of 10,000 KVA., the weight and size of the 3-phase units makes it difficult to ship, erect and handle, and for such capacities single-phase units are frequently advisable.

The relative advantages of star and delta connection for transformers have been pretty thoroughly discussed at various times and seem to be reduced to these features. With delta connection, 1 set of coils on a 3-phase transformer or 1 of a bank of 3 single-phase transformers can be cut out of circuit, and the remaining 2 can then be connected in open delta and deliver approximately 58 % of the output of the bank, with the same heating. With star connection the voltage on any one transformer is only 58 % the amount between lines, and the neu-

Digitized by Google

tral point is available for grounding, inserting series transformers, or other purposes. The question of using star connections and grounding the neutral solidly or through a resistance is a much mooted one and the practice of some engineers, particularly for extremely high voltage, favors the star connection with neutral grounded through a resistance, that would limit the current to flow through a grounded line to 3 or 4 times the normal full load current of the transformers connected between that phase and the ground. Other engineers of equal note recommend delta connection and ungrounded circuits.

With a solidly grounded neutral every additional ground on the transformers, line, etc., develops immediately into a short circuit, which in turn causes severe mechanical stresses on the windings of the transformers and generators, as the probability of severe and destructive arcs is much greater on a grounded than on an ungrounded system. Grounding the neutral point of the star connection, however, limits the voltage between any conductor and ground to 58 % of the normal voltage between conductors, and for extremely high voltage, this is often of the utmost importance in limiting the insulation strain of the transformers, switching devices, protective apparatus, and transmission line. As far as protection to the apparatus is concerned, the advantages of solidly grounding the neutral far outweigh the disadvantages.

As far as the line is concerned, it must be understood that on a grounded neutral system every ground on a line wire immediately results in a short circuit and the resulting arc will continue until the power on that section of the line is cut off. If there is only one or even two transmission lines, connecting the generating station with the point of distribution, the resulting shut down of the line due to a ground on one phase wire is of very grave importance, but, where there are three or more transmission lines, the shutting down of one line is of comparatively smaller importance. If any arrangement is made for automatically cutting out a damaged section of transmission line, due to insulation trouble, and transferring the load to the other lines, it is feasible to operate with a solidly grounded neutral with little likelihood of complete shutdown due to its use.

In order to give some idea of the various sizes of transformers actually built or designed by one company for service at

Digitized by Google

100,000 volts or above, some typical examples have been selected, and, for the sake of convenience, reference letters have been assigned to them.

Fig. 1, transformer " A „, shows a 1000 KVA., 100,000 volt, 60 cycle self cooling transformer for outdoor service used on the lines of the Southern Power Company. The most interesting features of this transformer are the tubular construction of its tank to obtain sufficient radiating surface for cooling, and the arrangement of the high tension leads, which are of the condenser type described later.

Transformer " B „ is a similar outdoor transformer of 3333 KVA. capacity self cooling, forming one of a bank of three for stepping down from 110,000 volts star to 11,000 volts delta, 25 cycles.

Transformer " C „ is a core type transformer 750 KVA. used on the 110,000 volt, 25 cycle circuits of the Hydro-Electric Power Commission of Ontario in one of their Sub-stations.

Transformer " D „ is a water cooled transformer 1000 KVA. used in one of the sub-stations of the Southern Power Company for stepping down from 100,000 volts to 2300 volts, 60 cycles. Fig. 2 is a sectional view showing the general arrangement of the cooling coils, iron core, windings, terminals, etc., in this transformer.

Transformer " E „, 3750 KVA., is of interest as being the first 100,000 volt transformer in commercial service having been installed on the 100,000 volt, 30 cycle circuits of the Grand Rapids Muskegon Water Power Company.

Transformer " F „ is one of the nine transformers 3750 KVA., used in three banks of three each at Niagara Falls, Ontario, for stepping up the 12,000 volts received from the Ontario Power Company to 110,000 volts for the 25 cycle transmission system of the Hydro-Electrie Power Commission of Ontario. Fig. 3 shows a group of these transformers installed and indicates the arrangement of the insulators, copper tubing and connections in the high tension circuits.

Transformer " G „ is one of several groups of three 4000 KVA. single-phase water cooled transformers used for tying together the 50,000 and 100,000 volts, 60 cycles systems of the Southern Power Company. Fig. 4 shows one of these assembled transformers, while Fig. 5 shows the coils and iron removed from the case.

Transformers " H „ and " I „ are exemples of 3000 KVA.,

Digitized by Google

140,000 volt, 60 cycle, single-phase transformers for the highest voltages actually built or designed for commercial service, at the time this paper was prepared, namely, 140,000 volts delta. " H „ was designed for tying together a 140,000 volt and a 40,000 volt system and to guard against any possible source of trouble that might arise from a connection between the two systems and a ground on one, an insulation test of 380,000 volts was required. " I „ was used in a substation where no such condition existed and was tested for 280,000 volts. Fig. 6 shows the main dimensions and the arrangement of transformer " H „.

Transformer " J „ is one of the six three-phase 7800 KVA., 60 cycle transformers to be installed in the station shown in Fig. 23 for stepping up from the generator voltage to 110,000 volts for power transmission.

Transformer " K „ is one of the four 10,000 KVA., three-phase, water cooled transformers, installed in the Baltimore sub-station of the Pennsylvania Water & Power Company. These transformers shown complete in Fig. 7, with coils and iron shown in Fig. 8, are at present used on a 66,000 volts circuit, but are tested for 180,000 volts and are insulated, so that they could be used satisfactorily on a solidly grounded neutral system with about 140,000 volts between outside wires.

Transformer " L „ is one of a large number of three-phase water cooled transformers of 10,000 KVA., capacity, to be used on a 120,000 volt 25 cycle system with a solidly grounded neutral.

Transformer " M „ is probably one of the largest transformers ever designed, having a capacity of 14,000 KVA. normal at 110,000 volts, 60 cycles. There is no reason, however, apart from the mechanical difficulties of transportation and assembly, why even larger transformers could not be designed and built if there were any actual demand for larger units.

With the exception of the core type 750 KVA. transformer symbol " C „, all of the transformers described and illustrated above are shell type. The relative advantages of core type and shell type transformers are subjects of discussion among engineers and designers and the merits of the two types will not be touched on here. The use of the shell construction for the larger transformers given above is the best indication of the opinion of the designers of these particular units regarding this point, and a few features of this shell type may be of interest.

Digitized by Google

Both high and low tension windings are divided into many flat coils of one turn per layer, the layers separated from each other by heavy insulating material, all of this insulating material being made as per drawing into sheets, angles, channel forms, etc., so that the proper assembling of the insulation is a comparatively simple matter and repairs can be affected promptly and surely. The turns of the high tension coils are insulated with heavy sleeving, the turns near the line terminals being extra heavily insulated. The coils are individually insulated and assembled into groups with strong insulating barriers between them.

Ventilating ducts of ample dimensions are distributed among the coils at frequent intervals to insure a uniform temperature through the interior of the transformers. The core consists of a superior grade of transformer sheet steel carefully annealed, and specially treated to prevent aging. Suitable bushings are provided in the case for high and low tension leads, the high tension bushings being of the condenser type described elsewhere.

The transformers are mounted in boiler iron cases, all seams of which are welded. The case is mounted on substantial cast iron base usually with wheels and provided with cast iron covers, through which the leads are brought. Suitable eye-bolts are provided so that the case, transformer and oil can be handled as a unit. The cover is provided with a relief valve, to take care of any excessive pressure that may be generated inside the transformer. The case is provided with a gauge at the top to show the height of the oil and pet cocks at the bottom for testing the condition of the oil. A thermometer placed near the top of the case with its bulb projecting into the oil indicates at all times the temperature of the surface oil. The thermometer is supplied with an electrical contact device, which will operate an alarm, should the temperature of the oil become excessive. A valve is provided at the bottom of the case by means of which the oil may be run out quickly.

The cooling coils are made of seamless brass tubing, spiral in form, and placed near the top of the case. They are made without connections or joints throughout the portion inside the case, and after forming, they are tested with an hydraulic pressure of 250 lbs. per square inch.

The temperature rise at full load of any part of these transformers above the temperature of the entering water, will not

Digitized by Google

exceed 40° C., the temperature being determined by thermometer and resistance methods. These transformers, when completed, stand an insulation test of double line voltage, from high tension to low tension and iron, for one minute.

Condenser type terminals:

For voltages of 100,000 and above, the necessary insulation for transformers, switch gear, etc., can only be obtained by the use of oil in the transformers and switching devices, and the use of oil, in large quantities such as is necessary for this class of apparatus, practically necessitates strong metal tanks, usually of steel, to contain the oil and to resist the pressure developed by arcs. It is, of course, necessary to take current at 100,000 volts or more into these tanks, normally through a metallic cover, and this has led to the development of terminals suitable for this very severe service.

It is self evident that such terminals must have sufficient mechanical strength to withstand successfully any pressure developed in the tanks by vapor, explosion, etc., and should be of such a design as not to require the cutting out of openings in the metallic covers of such sizes, as to weaken these covers and electrically these terminals must have sufficient strength so that any break-down in the high tension system will occur elsewhere than at the terminals.

The various transformers and circuit breakers illustrated and described in this paper are provided with so-called " condenser type „ terminals, described in a paper read April 1909, by Mr. A. B. Reynders before the American Institute of Electrical Engineers. Fig. 9 shows one of these terminals designed for use with a 300,000 volt testing transformer. The rod or tube forming the conductor is surrounded by a number of concentric condensers of pre-determined capacity, arranged in such a manner, that they are in effect connected in series so that the fall of static potential from the inner one, forming the line conductor, to the outer one, which is grounded, is such as not to strain the insulating material beyond its dielectric strength.

It may be noted that the rod or tube is surrounded by a layer of insulating material, which in turn is covered by a thin layer of tinfoil, the alternate layers of insulating material and tinfoil form condensers. The ends of the terminal are tapered off in

Digitized by Google

steps, one step at the end of each layer of tinfoil. This arrangement of metallic cylinders fixes the potential difference between them and keeps it within the puncture strength of the insulation. As the edges of the metallic layer extend to the edges of the cylinder of insulation, immediately surrounding it, the difference of potential along this surface is definitely fixed and can be kept less than the puncture strength of the surrounding medium, air or oil.

These terminals are made by winding paper under heavy pressure and at a high temperature around the metallic rod or tube that forms the conductor. The various layers are bonded by a resinous gum and the temperature is so high that the gum is melted, making a perfect bond between adjacent layers so that the tube, when completed, is virtually one solid mass.

Due to the leakage capacity to ground it has been found advisable to increase the capacity of the condenser at the line ends by placing a large metallic shield on the end of the conductor as shown. Another disturbing element, found in actual service, arises from the corona that tends to form, due to the sharp edges of tinfoil, but this is taken care of by the addition of metallic rings, electrically connected to the ends of the layers of tinfoil and the use of shields or balls at the ends of the inside conductor.

As shown in Fig. 1 and Fig. 11, illustrations of transformers and switch gear, this condenser type terminal is adapted for outdoor service by covering the portion of the terminal projecting into the air by porcelain and filling in the space between the tube and the porcelain with a solid insulating material.

Oil circuit breakers:

The development of this condenser type of bushing, with its capacity distributed in such a way, as to secure a practically uniform potential gradient throughout the mass of the insulation, has greatly facilitated the design of high tension switching devices. Due to the fact that there is practically no external static field where the lead passes through the top of the case, a cast iron cover can be used for the switching devices with the bushings solidly clamped to the cover. This construction permits the assembling of all of the mechanism on this cover and greatly simplifies assembling and inspection.

Digitized by Google

Fig. 10 shows a large number of oil circuit breakers installed in the 110,000 volt main switching station of the Hydro-Electric Power Commission of Ontario at Dundas. Each pole of the circuit breaker is located in a welded steel tank with treated linings and is complete with all of its mechanism mounted on its cast iron top.

As each pole is entirely independent, with the operating rod forming the only mechanical connection between them, the spacing of the poles of this breaker can be made to suit the station wiring. For electrical operation of these breakers a solenoid is used for closing the breaker, through a simple system of levers and links with a pull rod connecting the poles, so that all open and close at the same movement. The breaker is held in by a latch mechanism and the tripping solenoid releases the latch. All adjustments are made after the mechanism has been assembled on the cover and before the latter is placed in the tank.

The contacts, terminals and mechanism of this type of breaker have the greatest simplicity and least number of points to be insulated, when compared with certain designs of European breakers, requiring a large number of double breaks in series per pole. This breaker has its stationary contacts deeply immersed in oil and these are screwed directly on the end of the brass tubes, that form the lead through the condenser bushings. The movable contacts are self aligning and provided with a heavy spring that is compressed when the breaker is closed. These movable contacts are carried by a heavy cross bar and the current is trasmitted to braided shunts so that the compression springs will not be damaged by the passage of current through them. When closing a wiping motion is obtained until a solid butt contact is obtained. The stationary and movable contacts are readily renewable. Where the pull rod passes through the cast iron covers, a stuffing box is provided that acts as a wiper in removing oil from the rods. The cover is securely bolted to a flange, riveted to the upper edge of the tank, and all hand holes are provided with dust and moisture proof hinged covers. The hand holes in the top cover are of sufficient size to permit the ready removal of contacts and cross bar, without dismounting the other parts of the circuit breaker. The condenser bushing leads with the stationary terminals can readily be unclamped and removed through the cover.

Digitized by Google

As a matter of interest it might be stated that there are a number of breakers of this type installed in the plant of the " Società Industriale Italiana „ for their Carbide Plant near Rome for the control of 1860 KVA. 48,000/50 volt transformers.

One of the advantages inherent in the condenser bushing type of insulation, for the terminals of the circuit breaker, is the possibility of placing series transformers for the operation of ammeters and relays directly around the condenser bushing leads, which form single turn primaries. In many cases these series transformers are located inside the tank of the breaker permitting the use of a simple, compact and cheap form of series transformers.

Figure 11 shows one of the outdoor type of oil circuit breakers installed on the 100,000 volts circuit of the Southern Power Company. The condenser bushing leads of this breaker are covered with a series of porcelain insulators, and the space between the bushing and the insulators is filled with a moisture proof compound. The operating mechanism is covered by a metallic hood part of it, being removed in this cut, and the pull rods, connecting the various poles of the breakers together, pass through pipes. The various joints are made thoroughly weather proof and outdoor breakers of this design have been operating very satisfactorily on the lines of the Dominion Power & Transmission Company near Hamilton, Ontario, the Niagara Lockport & Ontario Power Company near Niagara Falls, N.-Y., and the Southern Power Company.

Fig. 12 shows an end view and side elevation of a 300 ampere, 140,000 volt breaker, arranged for hand operation and provided with suspension insulator type of disconnecting switch. This same breaker is readily arranged for electrical operation by means of a solenoid.

The automatic tripping of this particular breaker was arranged for by means of a series trip device comprising a solenoid in the high tension circuit, this solenoid being suspended from a series of link insulators. This series trip device is also shown in figure 10 the main switching station of the Hydro-Electric Power Commission.

It may be noted from Fig. 12 that the height to the top of the disc at the end of the terminal of the oil circuit breaker is 12 feet (3.66 metres) while the disc on the right is provided with extension arm and pin for use with a suspension insulator

Digitized by Google

type of disconnecting switch. The height to the end of this pin is 13 feet (3.96 metres) and an additional height of 3 feet (0.915 metres) is required for the purpose of removing the condenser bushing terminal with its contacts from the tank of the breaker.

As all circuit breakers in actual service require a certain amount of inspection, adjustment and repair, it is customary to furnish disconnecting switches for isolating such breakers from the source of power, so that they may be examined in perfect safety without shutting down the station.

For voltages of 100,000 and above, the usual petticoat type of insulator mounted on a pin and provided with a blade type disconnecting switch has not been found satisfactory, due to mechanical reasons.

Fig. 10, previously referred to, shows a large number of disconnecting switches mounted on porcelain pillars in the 110,000 volt switching station of the Hydro-Electric Power Commission.

For still higher voltages a somewhat different type of disconnecting switch is usually found more satisfactory.

Fig. 12 illustrates the suspended type of disconnecting switch used for isolating the 140,000 volts oil circuit breakers previously referred to. The main features of this type of switch consist of a series of suspension link insulators with a funnel shaped contact at the end.

This funnel shaped contact can be dropped over a pin contact attached to the condenser bushing terminal of an oil circuit breaker or transformer. A flexible lead connects from the funnel shaped movable contact to the busbars or other source of power. With an arrangement of this type two or more single pole switches can be operated as a multiple pole switch and a suitable signal device can readily be arranged to indicate, by means of a lamp or other device on the switchboard, whether the disconnecting switch is in the open or closed position. If desired, this switch can readily be operated by a small motor or solenoid and can readily be arranged to be interlocked with the oil circuit breaker.

Lightning arresters:

The question of the protection of transformers, switching stations and transmission lines from the effect or lightning or

Digitized by Google

other high potential surges, is one of importance and is usually considered in connection with the switching equipment.

Various types of lightning arresters have been developed for this service and Fig. 13 shows an installation of electrolytic lightning arresters, installed for the protection of the 110,000 volt transmission lines of the Hydro-Electric Power Company of Ontario.

These lightning arresters are provided with a horn gap device, usually mounted on a pipe framework and arranged so that the length of gaps can easily be adjusted while the arrester is in service. The arrester itself consists essentially of a system of nested aluminum cup shaped trays, as shown in Fig. 14, suitably supported and arranged in a steel tank; these trays contain a liquid electrolyte which forms insulating films on their surfaces, which films prevent passage of current at normal voltages, these films break down at abnormal voltages and form free paths for these abnormal voltages or static discharges. On the cessation of the abnormal stress, the film regains its original resistance. It may be noted from Fig. 13 that these arresters are arranged for outdoor service. The aluminum trays filled with electrolyte are completely immersed in transformer oil contained in the steel tanks. This oil provides for insulation and cooling and prevents evaporation of the electrolytes. The volume of oil in the tanks, which are nearly filled, is great enough to absorb the heat due to a continuous discharge for a long period.

It is usually necessary to charge this type of arrester periodically for the purpose of maintaining the film of oxide on the aluminum plates, and the horn gaps are readily adjustable so that in one position the line current will arc across the gaps and charge the cells. In a second position the gaps are so set as to only discharge at a pre-determined point, slightly above the operating voltage, while in the third position of the horn gaps, the gap is so large as to prevent the possibility of arcing across and in this manner act as a disconnecting switch when it is necessary to inspect the tanks containing the electrolytic cells.

In order to give some idea of the approximate size of high voltage electrolytic lightning arresters with their horn gap charging devices Fig. 15 shows the horn gaps for 140,000 volts lightning arrester operating on an ungrounded neutral system: Fig. 16 shows the tanks themselves.

Digitized by Google

Where a somewhat cheaper form of lightning arrester is required for extremely high voltage and outdoor service, it is possible to adopt the arrangement shown in Fig. 17 which illustrates some of the 3-phase lightning arresters on the 100,000 volt system of the Southern Power Company. With this type of arrester, instead of providing aluminum cells placed in steel tanks, resistances are located in the circuits between the line horn gaps and ground, these resistances being built up in the form of large columns having a large cross section and great heat absorbing capacity. Two columns in series are used betwen line and ground in each phase. The columns in question are made of a special mixture of concrete and red oxide of iron and, as indicated, a column is divided up into a number of sections by expanded metal imbedded in the concrete. The edges of this expanded metal are rivetted to sheet metal eaves which prevent water running down the sides of the concrete and thereby obviates the variation in resistance due to the concrete becoming water soaked. These sheet metal eaves serve also as terminals for the shunt horn gaps. All metal that is susceptible to rust is galvanized. The operation of these arresters is on the same principle as other shunted gaps arresters, that is, a light discharge passes over the series gaps and through the resistances, heavier discharges pass over one or more of the shunt gaps and direct stroke will probably pass over all the shunted gaps. The arrester, after once being adjusted, will require no attention or care whatsoever and is designed to give such rugged construction as to make it almost impossible that it should be seriously damaged by any discharge which would pass through it. An additional feature of the resistance column is that it has a high resistance for low voltage and a low resistance for high voltage, giving in fact a partial safety valve effect within the resistance itself.

The question of the necessity for or advisability of the use of lightning arresters of any kind on extremely high voltage lines is a debatable one, particularly if the amount of power on the transmission line is limited. With a comparatively small amount of power, the normal full load current on a high tension line is comparatively small and any lightning discharge passing through an arrester with the current, which momentarily follows it, may absorb practically the entire power of the system, interfering with the delivery of power and in some cases causing the

Digitized by Google

tripping of automatic breakers in the power houses practically shutting down the transmission system.

Station arrangements:

A few typical examples, showing the arrangement of high tension station with their connections, control desk, etc. may be of interest.

Fig. 18 shows the main connection of a plant with 2-500 KW. 250 V. exciters, 6-10,000 KVA. 6,600 V. 3-phase generators, 6-banks each of 3-3333 KVA. single phase transformers delta connection in low tension, star connection in high tension, and 4-20,000 KVA. 110,000 V. 3-phase transmission line.

Following the usual practice in plants of this size, the switchboard properly so-called is made in the form of a control desk as shown in fig. 19.

The top slab of this desk is made of marine finished slate with the operating handles and dial plates of the circuit breaker and other controllers mounted on the top and front of the desk, while the controllers themselves are inside the desk, so that there is absolutely no liability of the station attendant coming in contact with the 250 V. operating circuit while working on the front of the desk. As all of the instruments, synchronizing equipment, etc. are operated from series and shunt transformers, there is no danger of the operator being able to touch any live circuit even of low voltage.

On the front portion of the desk are placed calibrating jacks that enable any of the switchboard instruments to be checked and calibrated without removing them from their position, the instruments themselves being located on an instrument frame back so that the operator can look under the instrument frame and over the desk to watch the operation of the machine which he is controlling.

Fig. 20 shows the plan view of this same generating station with its step up transformer station.

Two exciters with their water wheels are placed practically in the center of the building, while the control desk, instrument stand and the panel switchboard for the exciters and field circuit will be placed on a low balcony overlooking the generating station.

As may be noted, the generator building is separated from

Digitized by Google

the transformer and switch house by a space of 20 ft. (6.1 m.) in order to secure better lighting and better ventilation for the two buildings.

As shown on this figure as well as on the cut showing the sectional view of the station, it is the intention that the 6,600 volt circuit breakers and bus bars should be enclosed in masonry compartments, while the 110,000 volt circuit breakers and bus bars should be open, owing to the great difficulty and expense of installing masonry structures for 110,000 volt circuit and the doubtful benefit to be obtained by such a course.

Fig. 21 shows the sectional view through this same generating station and transforming station and indicates the general arrangement proposed for the apparatus in these two buildings.

As may be noted from this figure, it is the intention that the generator should draw in air around the shaft and should discharge it at the bottom of the stator to a short duct connecting with the tail race. With this arrangement of discharging the heated air from the generators into the tail race and locating the field rheostat resistances of the generators outside the building, the question of securing proper ventilation for the building is greatly simplified.

As may be noted, the control desk, instrument board and exciter switch board are placed on a gallery in such a manner that the station attendant standing at the desk can readily observe the operation of the generator which he is controlling.

As may be noted, it is the intention to locate the 110,000 volt horn gaps and the tanks for the electrolytic lightning arrester on the roof of the station.

An shown on this drawing, the generating station and transformer house are to be erected on the side of a hill having a grade of approximately 30 %, and advantage of this grade is taken in the arrangement of the transformer house, to minimize the amount of material required for that building.

As an example of a somewhat similar arrangement of power plant, using 3-phase transformers and combining the transformer house with the generating station, fig. 22 shows the general arrangement of a power plant to contain 2-300 KW. 250 V. water wheel driven exciters, 6-7,800 KVA. 3-phase generators, 6-7,800 KVA. 3-phase transformers stepping up to 110,000 volts, 3-750 KVA. transformers stepping up to 33,000 volts and 3 smaller transformers for station service.

Digitized by Google

As an example of a station designed for still higher voltages, fig. 23 shows the arrangement of a plant taking care of 2-140,000 volt 3-phase incoming lines, 3 banks of step down transformers and the necessary switching equipment.

In this station the electrolytic lightning arresters are located on the roof of the station, while the disconnecting switches, circuit breakers, transformers, etc. are inside the station. The general arrangement is almost self evident from the cut.

The question of using outdoor transformer stations for extremely high voltages is one of a great deal of interest and is one that is receiving a great deal of consideration from designers.

Fig. 24 shows an outdoor station for the control of 4-110,000 volt circuits, 6-10,000 KVA. banks of transformers.

As may be noted, the high tension busses and the disconnecting switches are mounted on steel structures supported on towers of wind mill design, while the oil circuit breakers and transformers are located on the ground below the disconnecting switches.

Owing to the number and the capacity of low tension circuit breakers needed for properly distributing the 11,000 volt current in a 60,000 KVA. installation, it was necessary to provide a small building to contain the oil circuit breakers and bus bars. For this service, the circuit breakers and bus bars have to be installed in masonry compartments owing to the enormous current available on the busses in cases of a short circuit.

The building also contains the small local service transformers with motor generator sets, storage battery for the electrical operation of the main circuit breakers, and this building also contains the switchboard on which the controlling devices for the various circuits are mounted as well as the instruments, relays, etc.

As a matter of interest, it might be stated that a 44,000 volt outdoor switching station in service on the lines of the Dominion Power & Transmission Co. in Canada has given entire satisfaction, notwithstanding the extremely cold weather, snow and sleet storms encountered in that neighborhood. Series transformers and oil circuit breakers are in use out of doors on the 66,000 volt circuits of the Ontario Power Co., while 100,000 volt oil circuit breakers have been in use for some time on the circuits of the Southern Power Co.

Digitized by Google

Transmissions Towers:

The various power transmission systems in America operating at 100,000 volts or above have practically no trouble due to their high operating voltages, and the use of steel towers and suspension insulators makes it possible to go to considerably higher voltage, if desired.

Fig. 25 shows the transmission towers, insulators and transmission lines on the 100,000 volt circuits of the Great Western Power Company in California, and it should be stated that these towers are placed 700 ft. centers, each tower carrying 2-3-phase transmission lines, the wires of each transmission being 10 ft. (3.05 metres) on center, while the 2 sets of lines are 17 ft. (5.2 metres) on centers. On this line there is a transposition every 3 1/3 miles (5.35 kilometres) and a complete spiral every 10 miles (16.05 kilometres). This line runs a distance of about 160 miles (257 kilometres) and the step up transformers on this line are connected in delta.

Fig. 26 shows one of the transmission towers on the 110,000 volt circuit of Hydro-Electric Power Commission of Ontario outside of one of the transformer stations. This line is operated from star connected transformers with ungrounded neutral, although provision is made for grounding the neutral if desired. The standard towers are placed about 550 feet (180 metres) apart and have an average height of 65 1/2 feet (21.5 metres) while longer spans and larger towers are used in special locations. On this system there are 2 transmission circuits running from step up transformer station near Niagara Falls to the main switching station at Dundas a distance of 52.75 miles (84.5 kilometres) and 2 additional transmission lines will probably be installed at a later date. From Dundas 2 lines run to Toronto a distance of 37.25 miles (60 kilometres). Two transmission lines run between Dundas and London over 2 routes forming one complete loop and 2 additional lines will be installed later. Along one route the distance between Dundas and London is 71.75 miles (115 kilometres), but along the other route it is 109.5 miles (176 kilometres). From London to Windsor, a distance of 142.2 miles (230 kilometres), one transmission line has been installed and a second one will be put in later.

The distance along the transmission line from Niagara Falls to Windsor, over one portion of the loop between Dundas and

Digitized by Google

London, is 304.45 miles (491 kilometres), while over the other portion of the loop is 266.7 miles (430 kilometres). This is probably one of the longest straight-away transmission systems in actual service at present, the route covered being shown in fig. 27. On these towers the minimum distance between wires is 8′ 0″ (2.44 metres) and where extra long spans are used this distance is increased up to 14′ 0″ (4.26 metres). From Niagara Falls to Dundas Aluminum cable 46″ (103 millimetres) diameter is used, while for the balance of the distance somewhat smaller aluminum cables are used.

Fig. 28 shows one of the strain type transmission towers on the 100,000 volt lines of the Southern Power Company. As may be noted, each tower carries two three-phase circuits, one of copper cable and the other of aluminum. The three wires of each circuit are located on the same side of the tower, the lowest conductor being 40 feet (12.2 metres) from the ground, the middle conductor 48 feet (14.65 metres) and the top 56 feet (17 metres). The height to the top of the tower where the ground wire is located is 65 feet (19.5 metres), while the horizontal distance between the conductors is 15 feet 8 inches (4.65 metres). The average span between towers is 600 feet (1.83 metres) and the maximum 1,500 feet (457 metres).

Fig. 29 is a map of this system which covers a large part of the States of North Carolina and South Carolina with a network of 11,000 volt, 50,000 volt and 100,000 volt circuits. At the present time there are about 65 miles (105 kilometres) of 11,000 volt 3-phase circuits, 510 miles (820 kilometres) of 44,000 volt lines, actually operating at 50,000 volts, and 733 miles (1140 kilometres) of 100,000 volt circuits and these are being continuously extended to cover new territory. Hydraulic Generating Stations at Great Falls, Rocky Creek, Ninety-Nine Islands, Catawba, etc., have a combined normal capacity of about 80,000 KW. at 80% power factor or 100,000 KVA., while other hydraulic stations are being installed. Steam turbine reserve stations of a total of about 30,000 KVA. have been equipped and provision made for others. At present about 50,000 KVA. capacity in transformers have been installed for tying together the 100,000 and 50,000 volt systems, 6,000 KVA. for tying together the 50,000 and 11,000 volt systems, 10,000 KVA. in 11,000 volt systems, 10,000 KVA. in 11,000 volt sub-stations, 50,000 KVA. in 50,000 volt transformers, 60,000 KVA. in 100,000 volt sub-stations, or a

Digitized by Google

total of about 180,000 KVA. transformers. Practically all of the apparatus for the entire system was supplied by the same manufacturing company, that built all of the apparatus described in this paper.

The Central Colorado Power Company is transmitting power at 110,000 volts from Glenwood Springs to Denver, a distance of 153.5 miles (246 kilometres). The Grand Rapids Muskegon Power Company put into service the first system of transmission at 100,000 volts or above in Northern Michigan and a 140,000 volt system is to be installed in the same neighborhood.

Other systems at voltages of 100,000 or higher are being proposed for various installations and engineers and designers are prepared to undertake power transmission at any voltage for which there is a real commercial demand.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

La plus grande valeur d'un travail technique présenté devant une assemblée d'ingénieurs réside dans les enseignements contenus dans ce travail, et dans ceux qui résultent de sa discussion. En conséquence le but de l'auteur a été de donner sur un sujet aussi étendu les renseignements les plus généraux qui peuvent être condensés en un article de développement moyen. Cette condensation oblige à effleurer certains sujets, et à en passer d'autres complètement sous silence, peut-être d'un intérêt primordial pour quelques ingénieurs.

Le fait même d'éliminer de ce travail toute considération et application théorique permet de le limiter au matériel industriel actuellement en fonctionnement, en construction ou projeté, pour un réseau de transport de force, existant ou en projet, matériel avec lequel l'auteur est personnellement familiarisé.

Il n'y a encore que relativement peu d'installations en service actuel ou en projet pour un fonctionnement à 100,000 volts et au-dessus, mais leur nombre augmente sans cesse.

Tandis que le courant continu à haute tension a été employé d'une façon très restreinte pour les transports de force, pratiquement tous les réseaux à haute tension de quelque importance emploient le courant alternatif triphasé, et le bon fonctionnement de ce système dépend tout d'abord des points suivants:

Transformateurs *pour produire et utiliser la haute tension;* Isolateurs *convenables pour l'appareillage à haute tension;* Interrupteurs *et dispositifs de distribution pour la commande de la haute tension;* Parafoudres *et dispositifs de protection pour la haute tension;* Dispositions des stations centrales *utilisables pour une installation à haute tension;* Lignes de transmission *pour la haute tension.*

Transformateurs.

Vu la difficulté d'obtenir, sans huile, une isolation assurant toute sécurité pour des tensions de 100,000 volts, et au-dessus, tous les transformateurs sont plongés dans l'huile.

Digitized by Google

La question des avantages relatifs des transformateurs triphasés ou monophasés a été résolue par la constatation que les transformateurs triphasés de moyenne puissance, si on les compare aux unités monophasées de la même puissance totale, ont l'avantage d'un prix de revient inférieur, d'un rendement plus élevé, d'un encombrement plus réduit, d'un poids plus faible, d'un cablage plus facile, d'une réduction des prix de transport et de construction; d'autre part leur plus grand désavantage est le prix plus élevé des unités de réserve et des réparations. En comptant une unité de réserve dans chaque cas, pour un ou deux circuits, les unités monophasées ont l'avantage au point de vue du prix; tandis que pour trois circuits ou plus les unités triphasées ont l'avantage.

D'autre part quand la puissance d'un transformateur triphasé ou d'un groupe de transformateurs monophasés atteint les environs de 10,000 KVA, le poids et les dimensions des unités triphasées rendent difficile le transport, le montage et la manutention, et pour de telles puissances il est souvent prudent d'employer des unités monophasées.

Dans le but de donner un aperçu des différentes caractéristiques des transformateurs construits ou calculés par une seule Société pour un service à 100,000 volts et au-dessus, quelques exemples-types ont été choisis.

Fig. 1. — *Vue d'un transformateur de 1000 KVA, 100,000 volts, 60 périodes, à refroidissement naturel, pour un fonctionnement en plein air en service sur les lignes de la Southern Power Co. Les points les plus intéressants de ce transformateur sont la construction tubulaire de l'enveloppe pour obtenir une surface de rayonnement suffisante au refroidissement, et la disposition des sorties haute tension qui sont du type " condensateur „ décrit plus loin.*

Fig. 2. — *Coupe montrant la disposition générale du serpentin de refroidissement, du circuit de fer, des enroulements, des sorties, etc., dans un transformateur de 1000 KVA à refroidissement par l'eau en service dans une des sous-stations de la Southern Power Co. pour abaisser la tension de 100.000 à 2300 volts, 60 périodes par seconde.*

Fig. 3. — *Vue d'un groupe de 3 transformateurs de 3750 KVA montés à Niagara Falls Ontario, montrant la disposition des isolateurs, l'entrée dans les transformateurs des serpentins de refroidissement, et les connections dans les circuits haute tension. Ces transformateurs sont employés pour élever la tension de 12.000 volts reçue de la Ontario Power Co. à 110,000 volts pour le réseau à 25 périodes par seconde de la Hydro-Electric Power Commission of Ontario.*

Fig. 4. — *Vue d'un transformateur complet dont la figure 5 montre les bobines et le fer sortis de la boîte. Ce transformateur est une unité de plusieurs groupes de trois transformateurs monophasés de 4000 KVA*

Digitized by Google

à refroidissement par circulation d'eau. Ces transformateurs sont en service pour relier les réseaux de 50,000 et 100,000 volts, 60 périodes par seconde, de la Southern Power Co.

Fig. 5. — *Vue montrant les principales dimensions et la disposition d'un transformateur de 3000 KVA, 140,000 volts, 60 périodes par seconde, monophasé. C'est la plus haute tension de service pour laquelle on ait construit ou calculé des transformateurs, du moins jusqu'au jour où ce travail a été préparé: à savoir, 140.000 volts en triangle. Il était prévu pour relier un réseau à 140,000 volts et un autre à 40,000 volts, et en prévision des difficultés provenant d'un contact entre deux réseaux ou de la mise à la terre de l'un d'eux, un essai d'isolation sous 380,000 volts avait été exigé.*

Après cela on trouvera l'un des 4 transformateurs de 10,000 KVA triphasés, refroidis par circulation d'eau, installés dans les sous-stations de Baltimore de la Pennsylvania Water Power Co. La figure 7 est une vue du transformateur complet; la figure 8 donne une vue des bobines et du fer. Jusqu'à ce jour ces transformateurs fonctionnent sur un réseau à 66,000 volts, mais ils ont été essayés à 180,000 volts et isolés de telle façon qu'ils peuvent être employés avec toute sécurité, sur un réseau dont le point neutre est soigneusement mis à la terre, pour une tension de 140,000 volts entre phases.

L'un des plus puissants transformateurs qui probablement ait été calculé a les caractéristiques suivantes: 14,000 KVA, 60 périodes par seconde, pour une tension de 110,000 volts. Mais il n'y a aucune raison, à part les difficultés mécaniques de transport et de montage, pour que l'on ne puisse pas calculer et construire des transformateurs encore plus puissants, si la demande venait à se produire pour des unités plus puissantes.

Bornes " Type condensateur „.

Pour des tensions de 100,000 volts et au-dessus, on ne peut obtenir l'isolation nécessaire pour les transformateurs, appareils de distribution etc. que par l'emploi de l'huile; cet emploi d'huile en aussi grande quantité qu'exige en pratique cette sorte d'appareils, conduit à l'emploi de caisses solides en métal, le plus souvent en acier, pour contenir l'huile et résister à la pression développée par les arcs. Par suite il est devenu nécessaire d'introduire le courant à 100,000 volts ou plus dans ces caisses en traversant en général le couvercle métallique, et c'est ce qui a amené le développement des bornes convenables pour un service aussi dur.

La figure 9 montre l'une de ces bornes calculée pour un transformateur d'essai à 300,000 volts. Le tube ou la tige formant le conducteur est

Digitized by Google

entouré d'un certain nombre de condensateurs concentriques, d'une capacité déterminée et disposés de telle façon qu'ils sont réellement connectés en série, en sorte que la différence de potentiel statique entre le condensateur intérieur, qui est au potentiel de la ligne, et le condensateur extérieur, qui est à la terre, soit telle que les matériaux isolants ne soient pas soumis à une contrainte supérieure à leur rigidité diélectrique.

Il faut remarquer que la tige ou tube conducteur est recouvert d'une couche d'isolant recouvert lui-même d'une mince couche d'étain, et d'isolants formant condensateurs. Les extrémités de la borne se terminent en gradins sur les couches successives d'étain, un gradin correspondant à chaque couche d'étain. Ce dispositif fixe la différence de potentiel entre deux cylindres métalliques et la maintient inférieure à la rigidité diélectrique des isolants. Les extrémités des couches d'étain s'étendent jusqu'aux extrémités de la couche isolante qui les recouvre immédiatement et la différence de potentiel le long de la surface extérieure est fixée de façon définitive et peut être maintenue inférieure à la rigidité diélectrique du milieu ambiant, air ou huile.

On peut voir, sur les figures 1 et 11, des transformateurs et disjoncteurs, sur lesquels cette borne " type condensateur „ est employée pour un service extérieur. On a recouvert la partie de la borne exposée à l'air par des isolateurs en porcelaine et rempli l'espace entre le tube isolant et la porcelaine par une matière isolante solide.

Disjoncteurs à Huile.

Le développement de ces isolateurs de sortie " type condensateur „, dont la capacité est divisée pour obtenir une différence de potentiel répartie d'une façon pratiquement égale à travers la masse des isolants, a facilité dans de grandes proportions l'étude des appareils de distribution à haute tension.

Par le fait même qu'il n'y a pratiquement aucun champ statique extérieur dû au passage des conducteurs à travers le sommet de la boîte, un couvercle de fonte peut être employé pour les dispositifs de distribution avec les tubes isolants solidement fixés sur le couvercle. Cette construction permet de réunir toutes les parties du mécanisme sur le couvercle et simplifie beaucoup l'assemblage et l'inspection.

La figure 10 montre un grand nombre de disjoncteurs à huile dans la principale station de distribution de Dundas de la Hydro-Electric Power Commission of Ontario. Chaque pôle du disjoncteur est placé dans une boîte en acier forgé avec paroi intérieure isolante, et le pôle est complet avec tout son mécanisme monté sur son couvercle en fonte. Comme chaque pôle avec la barre de commande formant la seule connection

Digitized by Google

entre pôles est indépendant, la distance entre les pôles de ce disjoncteur peut être fixée à la demande du cablage de la station. Pour la commande électrique de ces disjoncteurs un solénoïde sert à fermer le disjoncteur au moyen d'un système simple de leviers et de tiges de commande réunissant les pôles en sorte que tous les pôles sont ouverts ou fermés au même moment. Le disjoncteur est maintenu en place par un verrouillage commandé par une bobine de déclanchement. Tous les réglages sont faits lorsque l'ensemble du mécanisme est monté sur le couvercle et avant que ce dernier soit placé sur la botte.

Les contacts, les isolateurs et le mécanisme de ce type de disjoncteur sont de la plus grande simplicité et possèdent le plus petit nombre de points à isoler si on les compare à certains dispositifs de disjoncteurs européens exigeant un grand nombre d'interrupteurs doubles en série par pôle. Ce disjoncteur a ses contacts fixes profondément plongés dans l'huile et ils sont directement vissés à l'extrémité du tube de cuivre qui constitue le conducteur à travers les isolateurs " type condensateur „. Les contacts mobiles sont guidés automatiquement et pourvus d'un puissant ressort comprimé quand le disjoncteur est fermé. Ces contacts mobiles sont supportés par une traverse solide et le courant est conduit par des shunts en tresse de cuivre afin que les ressorts de compression ne soient pas endommagés par le passage du courant. A la fermeture on a un contact par glissement jusqu'à ce qu'un contact solide définitif soit obtenu. Les contacts fixes et mobiles sont rapidement remplaçables.

Il me semble de quelque intérêt de signaler qu'un certain nombre de disjoncteurs de ce type sont utilisés dans l'installation de la Société industrielle Italienne dans sa fabrique de carbure aux environs de Rome pour la commande de transformateurs de 1860 KVA, 48,000/50 volts.

Un des avantages inhérents à l'isolation des bornes " type condensateur „ des disjoncteurs est la possibilité de pouvoir disposer des transformateurs-série pour la commande des ampèremètres et des relais directement autour des bornes " type condensateur „ qui forment des primaires d'un seul tour.

Dans bien des cas ces transformateurs-série sont placés à l'intérieur de la boîte du disjoncteur, ce qui permet d'employer une forme peu encombrante et économique de transformateurs.

La figure 11 montre un des disjoncteurs à huile du type pour fonctionnement à l'extérieur, installé sur les circuits de la Southern Power Company. Les différents joints sont parfaitement étanches à l'eau et les disjoncteurs de plein air de ce type ont fonctionné en donnant entière satisfaction sur les lignes de la Dominion Power and Transmission Co. aux environs d'Hamilton, Ontario; de la Niagara Lockport and Ontario

Digitized by Google

Power Co. aux environs de Niagara Falls, New-York, et de la Southern Power Co.

La figure 12 montre une vue en bout et une vue de côté d'un disjoncteur de 300 ampères 140,000 volts disposé pour la commande à la main et prévu avec un couteau de sectionnement " type à isolateurs suspendus ". Ce même disjoncteur peut être rapidement transformé pour la commande électrique au moyen d'un solénoïde.

Comme tous les disjoncteurs actuels nécessitent une certaine surveillance, des réglages et des réparations, on a l'habitude de fournir des couteaux de sectionnement pour isoler ces disjoncteurs de la source électrique de façon que l'on puisse les examiner en parfaite sécurité sans être obligé de mettre la station hors de service.

Pour des tensions de 100,000 volts et au-dessus les isolateurs du " type à cloche " montés sur une tige et équipés avec un interrupteur de sectionnement du type couteau n'ont jamais fonctionné d'une façon satisfaisante, pour des raisons mécaniques.

La figure 10, à laquelle on s'est déjà reporté, permet de voir un grand nombre de couteaux de sectionnement montés sur des bornes en porcelaine dans la station de distribution à 110,000 volts de la Hydro-Electric Power Commission of Ontario.

Pour des tensions encore plus élevées on utilise ordinairement avec plus de satisfaction un type de couteau de sectionnement légèrement différent.

La figure 12 montre le type de couteau de sectionnement suspendu employé pour l'isolation des disjoncteurs à huile de 140,000 volts. Les particularités de ce type de couteau de sectionnement consistent en des séries d'isolateurs " type suspendu " avec un contact conique placé à la partie inférieure.

Parafoudres.

Différents types de parafoudres ont été établis pour ce service et la figure 13 présente une installation de parafoudres électrolytiques installés pour la protection des lignes de transmission à 110,000 volts de la Hydro-Electric Co. of Ontario.

Ces parafoudres sont prévus avec un dispositif à corne monté généralement sur une charpente tubulaire et de telle façon que l'écartement puisse être réglé pendant le service des parafoudres. Le parafoudre lui-même consiste essentiellement en un système de bacs en aluminium s'emboîtant l'un dans l'autre, comme on peut le voir sur la figure 14, supportés d'une façon convenable et arrangés dans un bac en acier. Ces

Digitized by Google

réservoirs contiennent un électrolyte liquide qui forme des pellicules isolantes à leur surface; ces pellicules empêchent le passage du courant à la tension normale et sont percées par une tension anormale; ils offrent un chemin libre pour ces dernières ou pour des décharges statiques. Lorsque la surtension a disparu la pellicule reprend sa résistance primitive. Il faut noter que sur la figure 13 ces parafoudres sont équipés pour un service en plein air. Les bacs d'aluminium remplis d'électrolyte sont complètement plongés dans de l'huile de transformateur contenue dans les bacs en acier. Cette huile sert pour l'isolation, le refroidissement et empêche l'évaporation de l'électrolyte. Le volume d'huile remplissant presque complètement le réservoir est suffisant pour absorber la chaleur dégagée par une décharge continue pendant un temps assez long.

Dans l'intention de donner une idée des dimensions approximatives d'un parafoudre à haute tension avec ses dispositifs à cornes de décharge on se reportera à la figure 15 montrant les cornes d'un parafoudre fonctionnant à 140,000 volts sur un réseau dont le point neutre n'est pas à la terre; la figure 16 montre les bacs à électrolyte.

En cas de besoin d'un dispositif de parafoudre légèrement meilleur marché pour de très hautes tensions et pour un fonctionnement en plein air, on peut employer le dispositif de la figure 17 qui représente les parafoudres triphasés du réseau à 100,000 volts de la Southern Power Co. Dans ce dispositif de parafoudre au lieu d'éléments en aluminium placés dans des bacs en acier, les résistances sont placées dans le circuit entre les cornes et la terre; ces résistances sont constituées par des colonnes ayant une large section et un grand pouvoir absorbant de la chaleur; et sur chaque phase se trouvent deux colonnes en série entre la terre et la ligne. Les colonnes en question sont constituées par un mélange de béton et d'oxyde rouge de fer, et, ainsi que la figure le montre, une colonne est divisée en un certain nombre de sections par du métal déployé encastré dans le béton. Les extrémités de ce métal déployé sont rivées à une couverture en tôle qui empêche l'eau de couler le long des parois du béton et s'oppose par suite aux variations de résistance dues à l'hydratation du béton. Ces couvertures en tôle servent aussi de supports aux cornes shunt. Toutes les parties métalliques susceptibles de rouiller sont galvanisées. Le fonctionnement de ce parafoudre est exactement le même que celui des autres parafoudres shunt, c'est-à-dire que les légères décharges passent à travers les cornes en série et les résistances; une décharge à plus haut potentiel traverse toutes les cornes shunt de même qu'un choc direct traverse toutes les cornes shunt. Le bénéfice que l'on retire de l'emploi des parafoudres sur les lignes à très haute tension est très discutable, surtout lorsque la puissance du transport de force est très limitée.

Digitized by Google

Avec des installations disposant d'une puissance relativement faible, le courant normal de pleine charge dans une ligne haute tension est relativement faible et chaque décharge atmosphérique passant à travers un parafoudre avec le courant de la ligne qui le suit momentanément, absorbe presque toute la puissance disponible du réseau, gêne le débit de puissance utile, et dans quelques cas cause le déclanchement des disjoncteurs de la station centrale, mettant le réseau hors service.

Disposition des stations.

Quelques exemples choisis, montrant l'arrangement des stations haute tension avec leurs connexions et les pupîtres de distribution, sont d'un certain intérêt.

La figure 18 montre les connexions principales d'une usine avec deux excitatrices de 500 KW, 250 volts et 6 alternateurs de 10,000 KVA, 6600 volts triphasés, 6 groupes comprenant chacun 3 transformateurs de 3333 KVA monophasés, montés en delta pour la basse tension, en étoile pour la haute tension, et 4 départs triphasés 20,000 KVA, 110,000 volts.

Suivant l'habitude employée dans des installations de cette importance le tableau proprement dit est constitué par des pupîtres comme il est montré par la figure 19.

La figure 20 donne le plan de la même station génératrice avec sa station de transformateurs élévateurs de tension.

Deux excitatrices avec leur turbines hydrauliques sont placées à peu près au centre du bâtiment, tandis que les pupîtres de contrôle, les tableaux des instruments de mesure, et les appareils de distribution pour les excitatrices et les circuits d'excitation sont disposés sur un balcon dominant la station génératrice.

Il faut noter que le bâtiment des génératrices est séparé du bâtiment des transformateurs et du tableau de distribution par un espace de 6.1 mètres dans le but d'assurer un meilleur éclairage et une meilleure ventilation des deux bâtiments.

Comme on peut s'en rendre compte sur cette figure et sur la vue en coupe de la station, on a voulu que les disjoncteurs à huile et les barres omnibus à 6600 volts soient enfermés dans des cellules en maçonnerie, tandis que les disjoncteurs et barres à 110,000 volts sont accessibles, vu la grande difficulté et la dépense pour installer des constructions en maçonnerie pour des circuits à 110,000 volts, et le bénéfice douteux que l'on obtiendrait par un tel dispositif.

Digitized by Google

La figure 21 présente une vue en coupe de la même station et de la station de transformation, et indique le dispositif général employé pour les appareils dans ces deux bâtiments.

Il faut remarquer que les pupîtres, tableaux d'instruments et tableau d'excitation sont placés sur une galerie de telle façon que le chef de station se tenant sur la galerie peut aisément observer la marche des générateurs qu'il commande.

Il faut noter également que l'on a logé les parafoudres à cornes à 110,000 volts et les cuves pour les parafoudres électrolytiques sur le toit.

Comme on le voit sur ce dessin, la station génératrice et la station de transformation sont élevées sur le flanc d'une colline ayant une pente d'environ 30 %; un avantage de cette disposition est visible dans le plan du poste de transformation où l'on a réduit au minimum la quantité de matériaux nécessaires à ce bâtiment.

Comme exemple à peu près semblable d'une station génératrice employant des transformateurs triphasés et combinant la station de transformation avec la station génératrice la figure 22 indique le dispositif général d'une station contenant: 2 excitatrices de 300 KVA, 250 volts, commandées par des turbines, 6 alternateurs de 7800 KVA, triphasés, 6 transformateurs 7800 KVA triphasés montant la tension à 110,000 volts, 3 transformateurs 750 KVA élevant à 33,000 volts et 3 transformateurs plus petits pour le service de la station.

Comme exemple d'une station à très haute tension on trouvera sur la figure 23 le dispositif d'une usine prévue pour 2 arrivées à 140,000 volts triphasés et 8 groupes de transformateurs abaisseurs de tension, et l'équipement nécessaire à la distribution.

L'idée d'employer des stations de transformateurs travaillant en plein air pour des tensions extrêmement élevées est une idée digne du plus grand intérêt et de la plus attentive considération des Ingénieurs.

Il est important de noter que les barres haute tension et les couteaux de sectionnement sont montés sur des poutres en acier portées par des charpentes métalliques, tandis que les transformateurs et les disjoncteurs à huile sont placés à même le sol au-dessous des couteaux de sectionnement.

La figure 24 montre une sous-station en plein air de ce genre pour le contrôle de 4 lignes à 110,000 volts et de 6 groupes de transformateurs de 10,000 KVA.

Considérant le nombre et les dimensions des disjoncteurs basse tension nécessaire pour distribuer le courant à 11,000 volts dans une station de 60,000 KVA, il a été nécessaire de prévoir un petit bâtiment pour contenir les interrupteurs à huile et les barres de distribution. Pour ce service, il est nécessaire d'installer les disjoncteurs et les barres de

Digitized by Google

distribution dans des compartiments en maçonnerie à cause de l'énorme courant qui circulerait dans les barres en cas de court circuit.

Il pourrait être intéressant de constater qu'une station de distribution à 44,000 volts en plein air est en service sur les lignes de la Dominion Power and Transmission Co. au Canada et donne entière satisfaction malgré le froid extrême, la neige et les tourmentes de grêle que l'on trouve dans cette région. Les transformateurs série et disjoncteurs à huile sont en service en plein air sur les lignes à 66,000 volts de la Ontario Power Co, tandis que des disjoncteurs à huile à 100,000 volts sont en fonctionnement depuis quelque temps sur les lignes de la Southern Power Co.

Poteaux de transmission.

Les différents réseaux fonctionnant en Amérique à 100,000 volts et au-dessus n'ont subi aucune perturbation due à leur haute tension de service; l'emploi de pylônes d'acier et d'isolateurs " type suspendu „ rend possible l'emploi d'une tension considérablement plus élevée si on le désire.

La figure 25 montre les pylônes de ligne, les isolateurs et les lignes des réseaux à 100,000 volts de la Great Western Power C.o en Californie; il faut remarquer que ces pylônes ont leurs axes distants de 310 mètres environ. Chaque pylône supporte deux lignes triphasées; les fils de chaque transmission sont à 3,05 mètres l'un de l'autre. Tandis que les 2 groupes de fils sont distants de 5,2 mètres.

La figure 26 montre l'un des pylônes de transmission des circuits à 110,000 volts de la Hydro-Electric Power Commission of Ontario à l'extérieur de l'une des stations de transformation. Cette ligne fonctionne avec des transformateurs montés en étoile avec point neutre non relié à la terre; un dispositif été prévu néanmoins pour mettre à volonté le point neutre à la terre.

La longueur de la ligne de Niagara Falls à Windsor sur une portion de la boucle entre Dundas et London est de 491 kilomètres, tandis que la longueur pour la partie plus courte de la boucle est de 430 kilomètres. C'est probablement un des plus longs transports de force en service actuellement. Le circuit est représenté par la figure 27.

La figure 28 montre un des pylônes de ligne, de la ligne à 100,000 volts de la Southern Power Co. Il faut noter que chaque pylône supporte deux circuits triphasés, l'un en cable de cuivre et l'autre en aluminium.

En figure 29 est une carte du réseau qui couvre une grande partie des États de la Caroline du Nord et du Sud avec des circuits travaillant à 11,000, 50,000 et 100,000 volts. A l'heure actuelle il y a en service

Digitized by Google

environ 105 kilomètres de circuits triphasés à 11,000 volts, 820 kilomètres de lignes à 44,000 volts et 50,000 volts et 1328 kilomètres de circuits à 100,000 volts qui sont continuellement étendus pour couvrir un nouveau territoire. Les stations génératrices Hydro-électriques à Great Falls, Rocky Creek, Ninety-Nine Islands, Catawba, etc. ont une puissance totale de 80,000 KVA avec un facteur de puissance de 0.8 soit 100,000 KVA. De nouvelles stations sont encore en construction.

Des stations de réserve commandées par des turbines à vapeur fournissant 30,000 KVA environ sont installées et d'autres sont prévues. Jusqu'ici il existe une puissance totale de 40,000 KVA de transformateurs installés pour réunir les circuits à 50 et 100,000 volts, 6,000 KVA pour réunir les circuits de 50,000 et 11,000 volts, 10,000 KVA pour réunir les réseaux de 100,000 et 11,000 volts, 10,000 KVA de sous-stations à 11,000 volts, 50,000 KVA de transformateurs à 50,000 volts, 60,000 KVA de sous-stations à 100,000 volts, soit un total d'environ 180,000 KVA de transformateurs. Tous les appareils de ce réseau ont été construits par la même Compagnie qui a construit tous ceux décrits dans cette étude.

D'autres réseaux à 100,000 volts et au-dessus sont en projet pour diverses installations et les calculateurs et ingénieurs sont entraînés pour entreprendre un transport d'énergie à n'importe quelle tension désirée.

Digitized by Google

List of Cuts.

Fig.
1. 1,000 KVA. Self Cooling Outdoor Type Single Phase Transformer.
2. 1,000 KVA. Water Cooled Single Phase Trans. Sectional View.
3. 3,750 KVA. Water Cooled Single Phase Transformers installed.
4. 4,000 KVA. Water Cooled Single Phase Transformer assembled.
5. 4,000 KVA. Water Cooled Single Phase Transformer Coils & Iron.
6. 3,000 KVA. Water Cooled Single Phase Transformer. Sectional View.
7. 10,000 KVA. Water Cooled 3-phase Transformer assembled.
8. 10,000 KVA. Water Cooled 3-phase Transformer Coils & Iron.
9. Condenser Bushing for 300,000 Volt Service.
10. 110,000 Volt Switching Station at Dundas.
11. 100,000 Volt Outdoor Type Oil Circuit Breaker.
12. 140,000 Volt Indoor Type Oil Circuit Breaker.
13. 110,000 Volt Electrolytic Lightning Arresters.
14. Aluminum Trays for Electrolytic Arrester.
15. Horn Gaps for 140,000 Volt Electrolytic Arrester.
16. Tanks for 140,000 Volt Electrolytic Arrester.
17. 100,000 Volt Concrete Column Arrester.
18. Diagram of Connections 60,000 Kva. 110,000 Volt Station.
19. Control Desk for 60,000 Kva. 110,000 Volt Station.
20. Plan View of 60,000 Kva. 110,000 Volt Station.
21. Sectional View of 60,000 Kva. 110,000 Volt Station.
22. Plan and Sections 110,000 Volt Station with 3-phase Transformer.
23. Arrangement 140,000 Volt Indoor Station.
24. Arrangement 110,000 Volt Outdoor Station.
25. Transmission Tower Great Western Power Company.
26. Transmission Tower Hydro-Electric Power Commission.
27. Map of Hydro-Electric Power Commission of Ontario.
28. Transmission Tower Southern Power Company.
29. Map of Southern Power Company System.

Digitized by Google

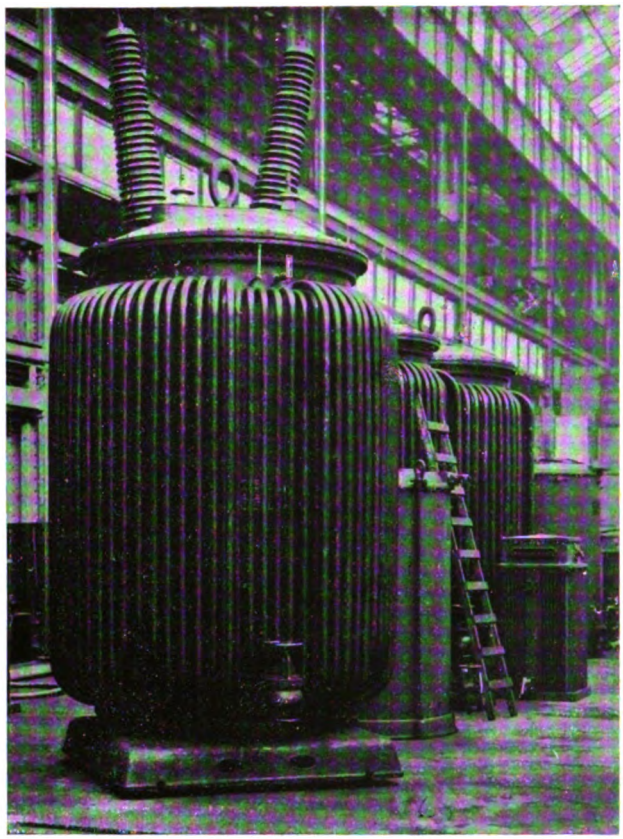


Fig. 1.

1000 KVA Self Cooling Outdoor Type Single Phase Transformer.

Digitized by Google

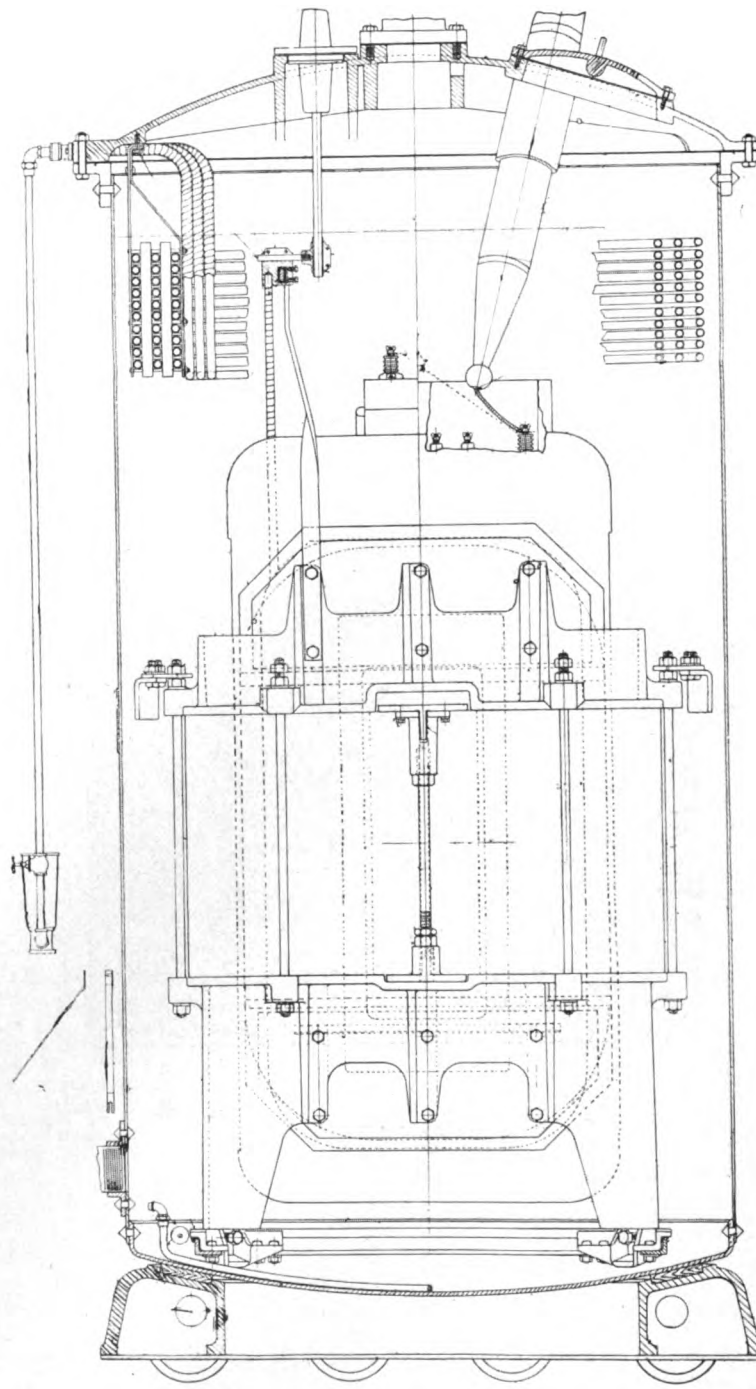


Fig. 2.

1000 KVA Water Cooled Single Phase Transformer Sectional View.

Digitized by Google

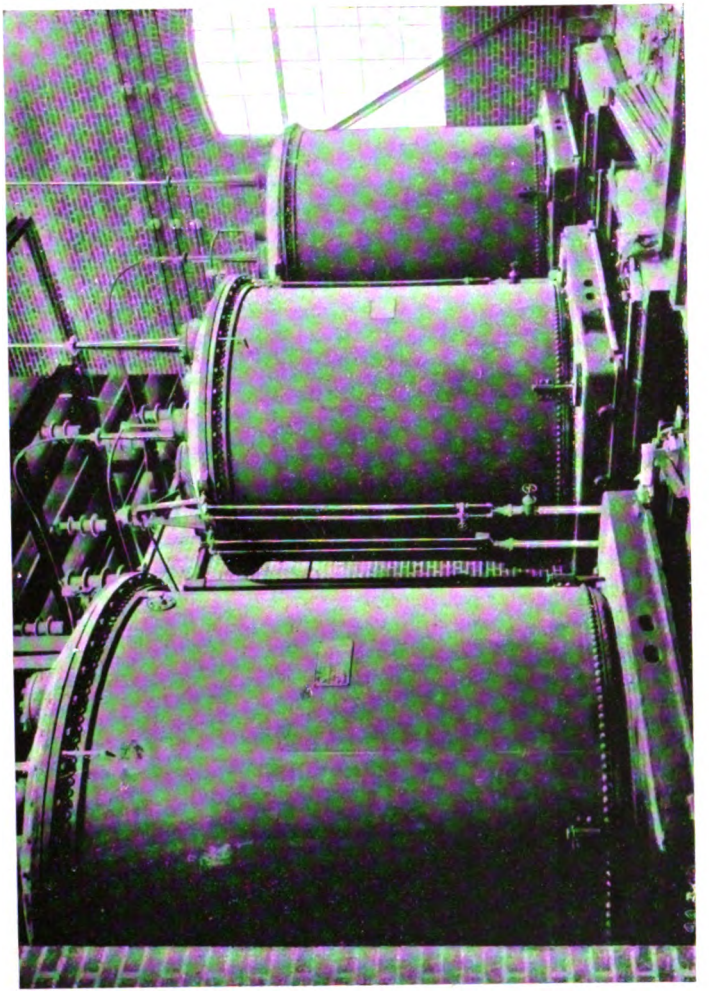


Fig. 3.

3750 KVA Water Cooled Single Phase Transformers Installed.

Digitized by Google

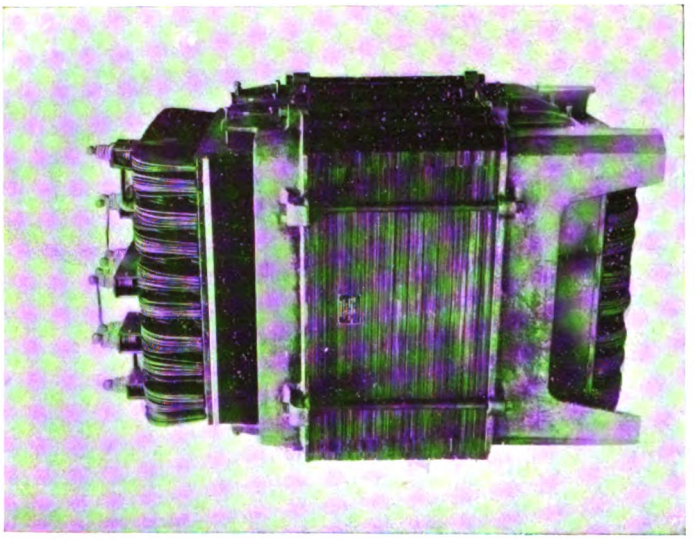


Fig. 5.
4000 KVA Water Cooled Single Phase
Transformer Coils & Iron.

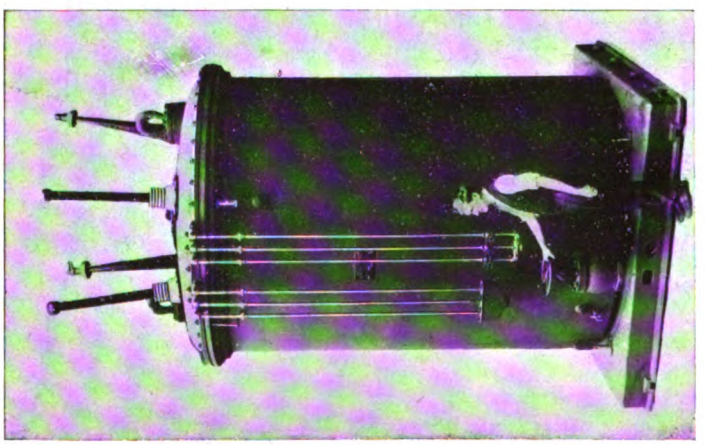


Fig. 4.
4000 KVA Water Cooled Single Phase
Transformer Assembled.

Digitized by Google

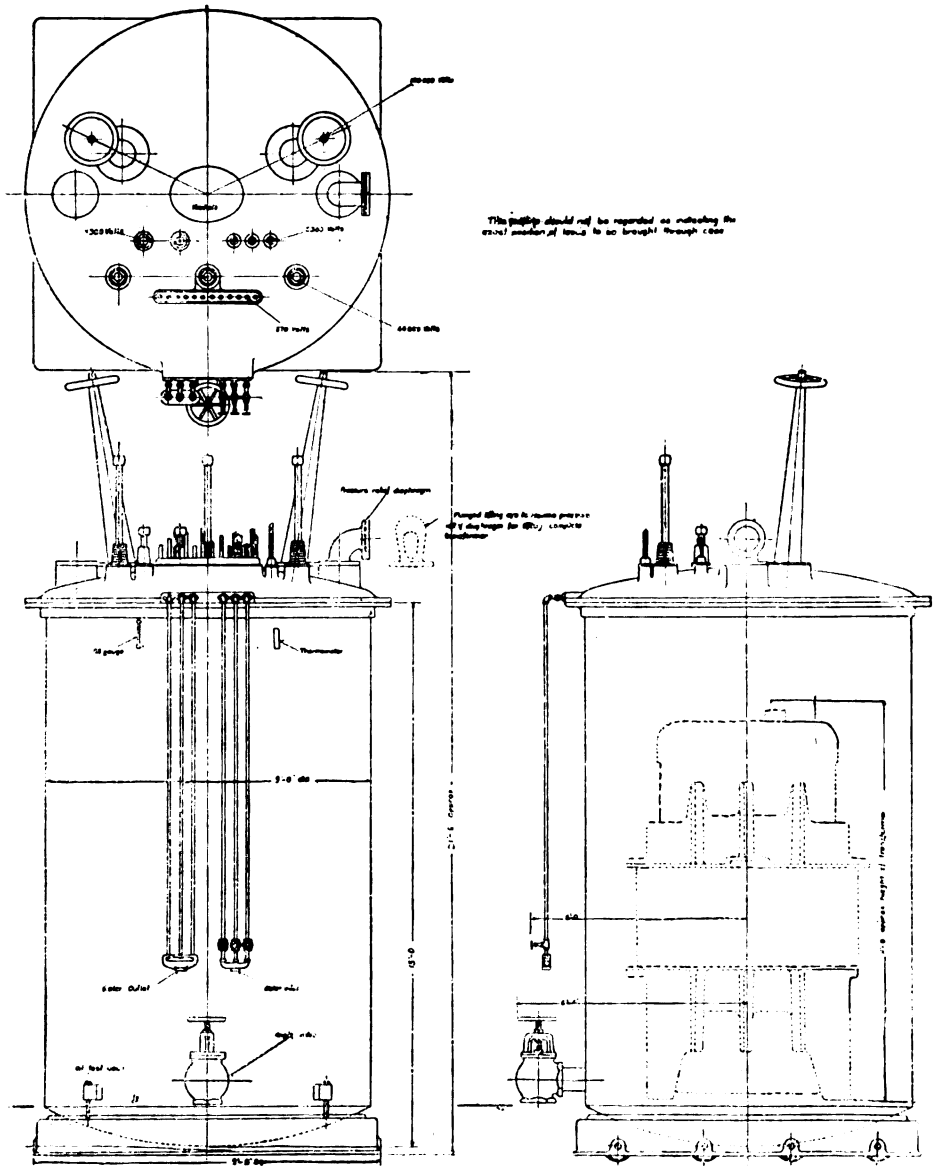


Fig. 6.

3000 KVA Water Cooled Single Phase Transformer. Sectional View.

Digitized by Google

Fig. 9.
Condenser Bushing
for 300,000 Volt service.

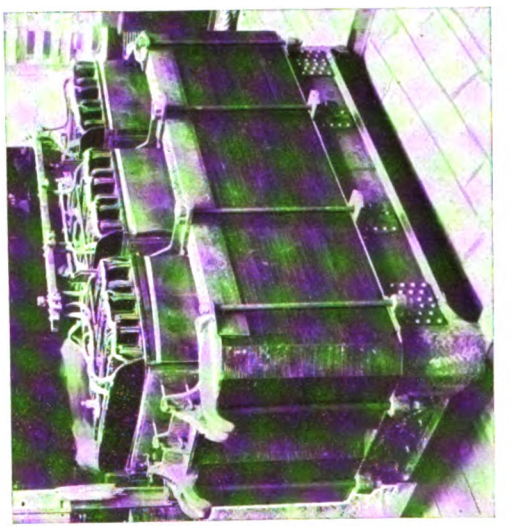


Fig. 8.
10,000 KVA Water Cooled Three Phase
Transformer Coils & Iron.

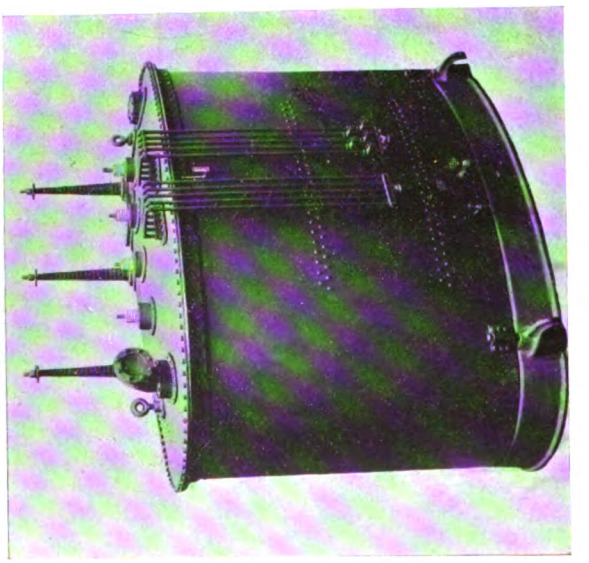


Fig. 7.
10,000 KVA Water Cooled Three Phase
Transformer Assembled.

Digitized by Google

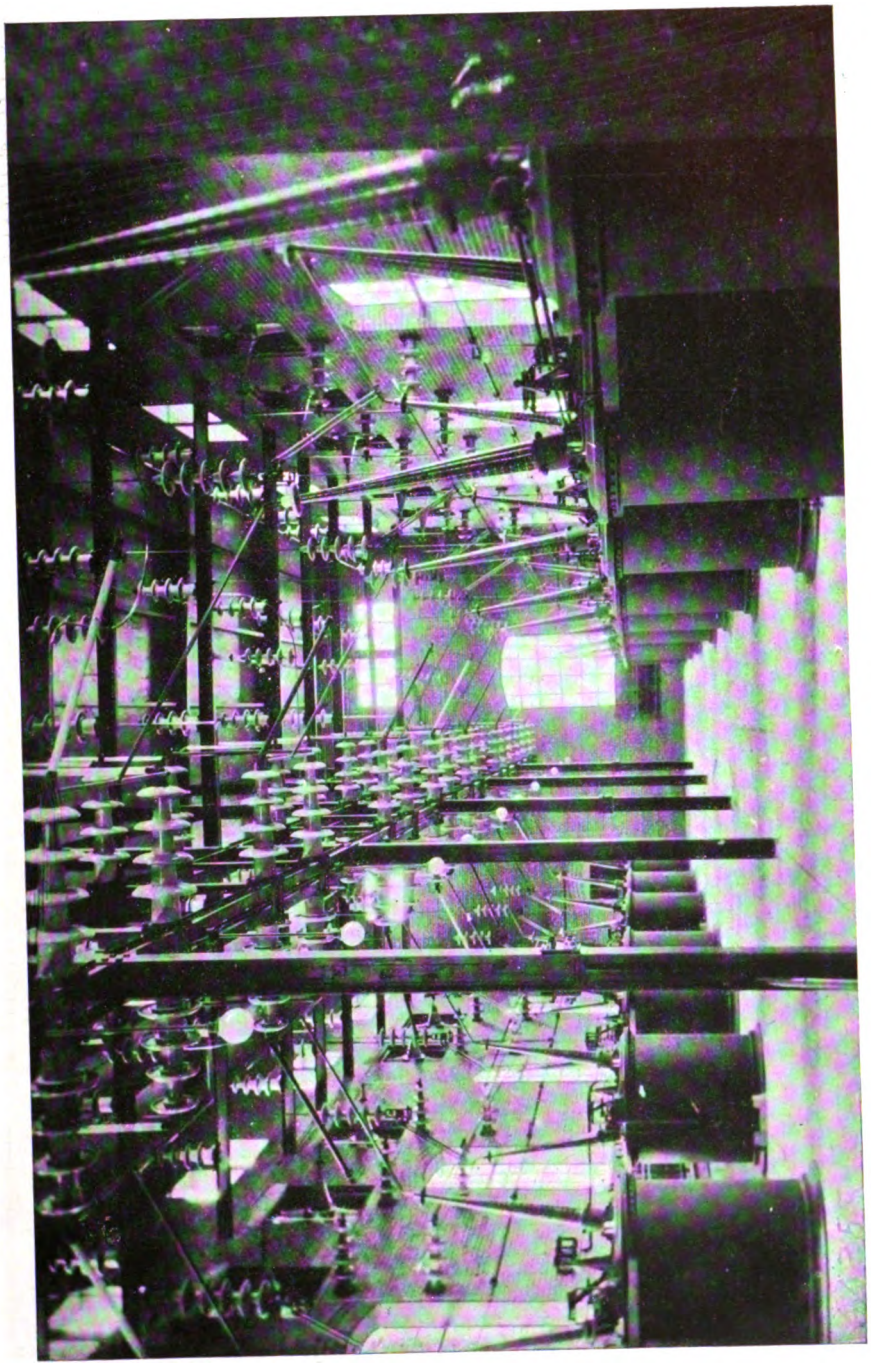


Fig. 10.
110,000 Volt Switching Station at Dundas.

Digitized by Google

Fig. 11.

100,000 Volt Outdoor Type Oil Circuit Breaker.

Digitized by Google

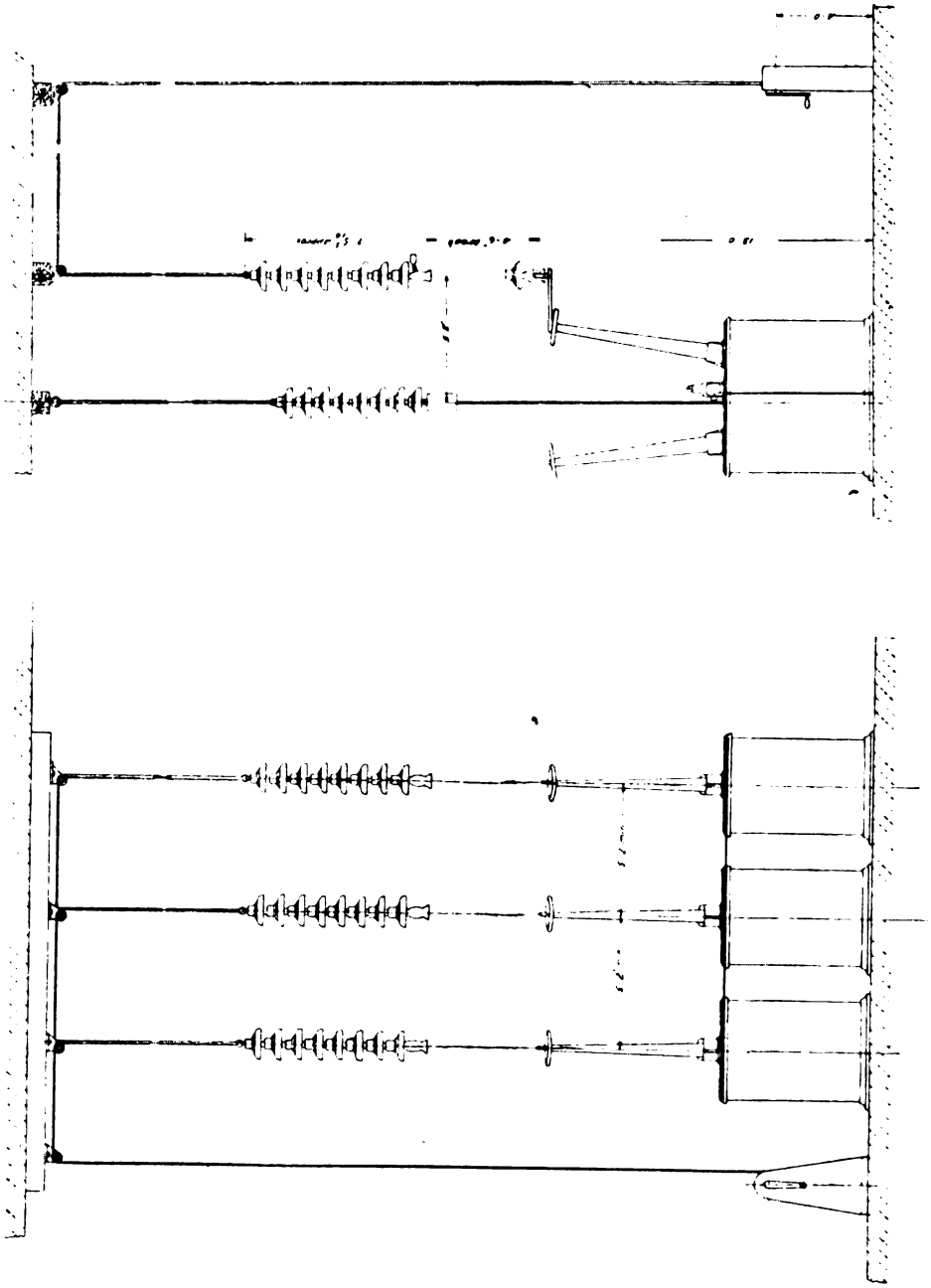


Fig. 12.
140,000 Volt Indoor Type Oil Circuit Breaker.

Digitized by Google

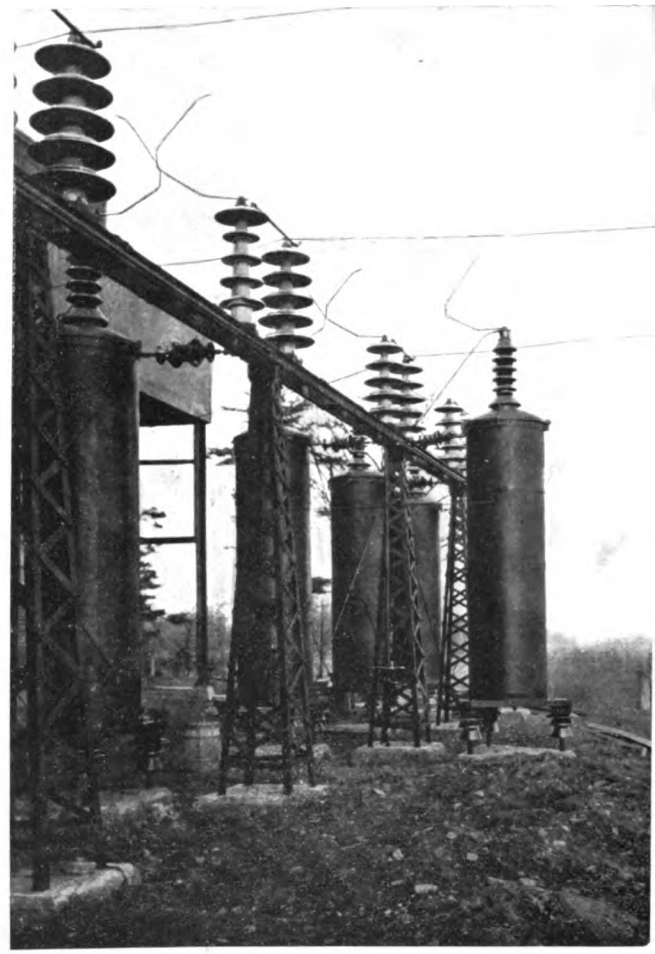


Fig. 13.
110,000 Volt Electrolytic Lightning Arresters.

Digitized by Google

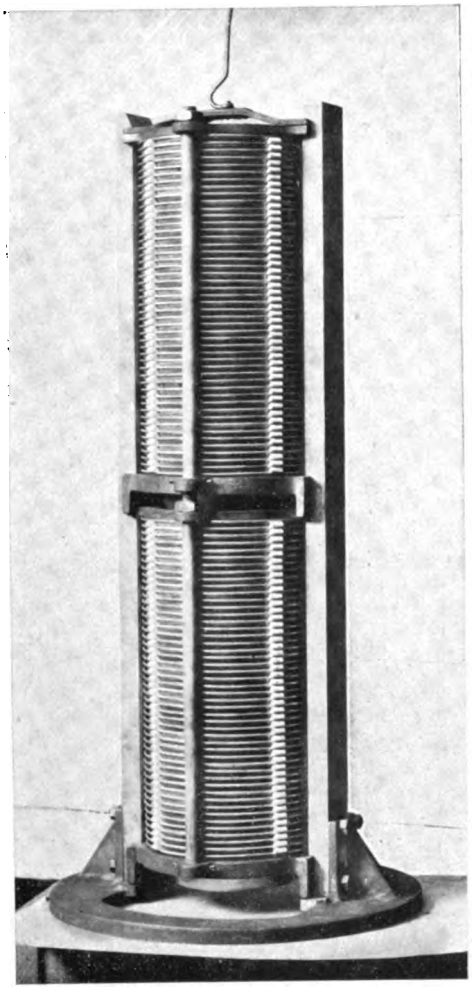


Fig. 14.

Aluminum Trays for Electrolytic Arrester.

Digitized by Google

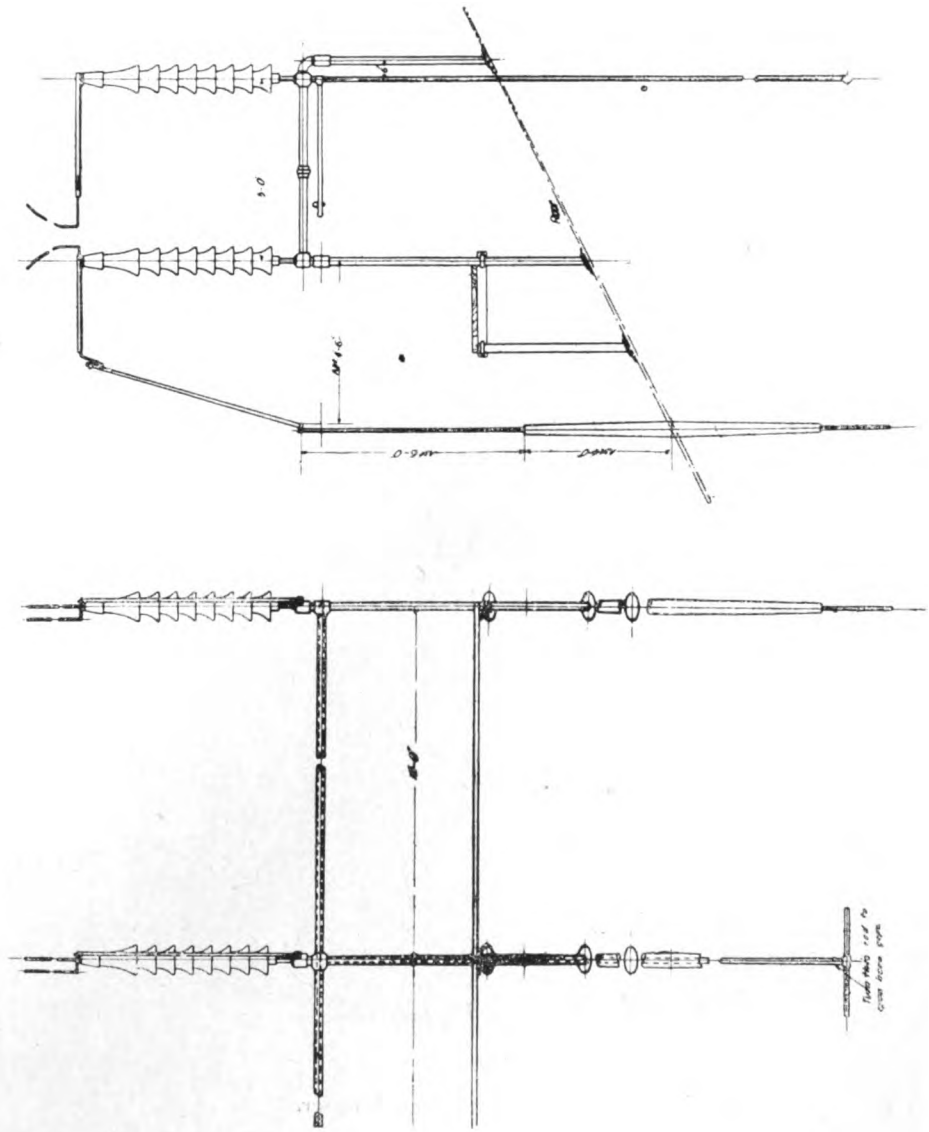


Fig. 15.
Horn Gaps for 140,000 Volt Electrolytic Arrester.

Digitized by Google

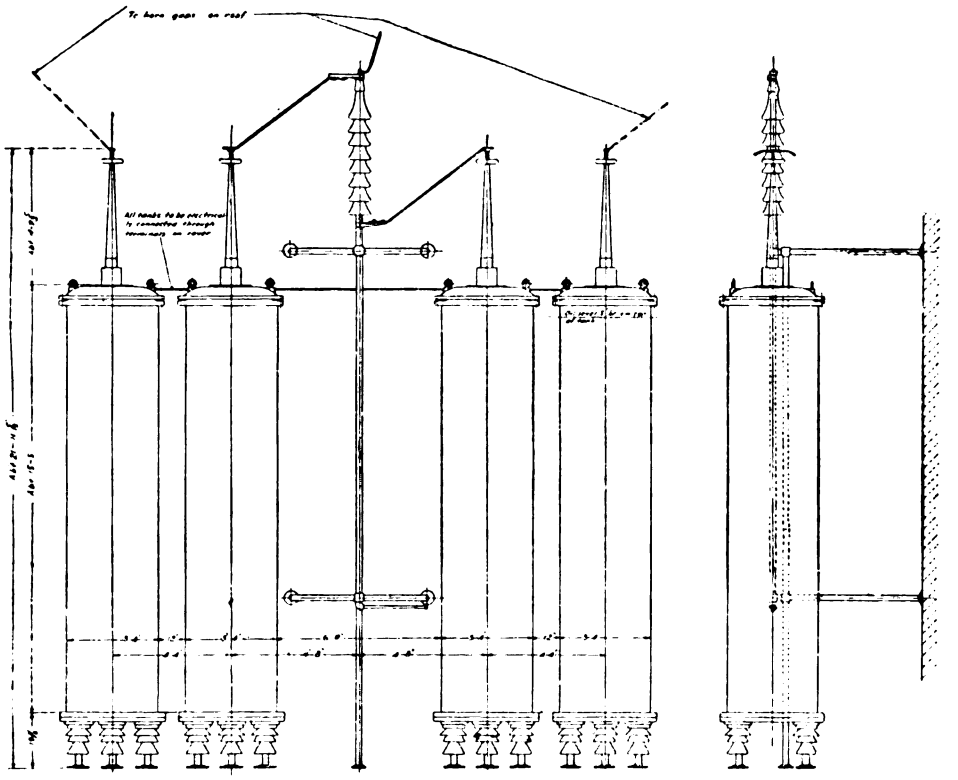


Fig. 16.

Tanks for 140,000 Volt Electrolytic Arrester.

Digitized by Google

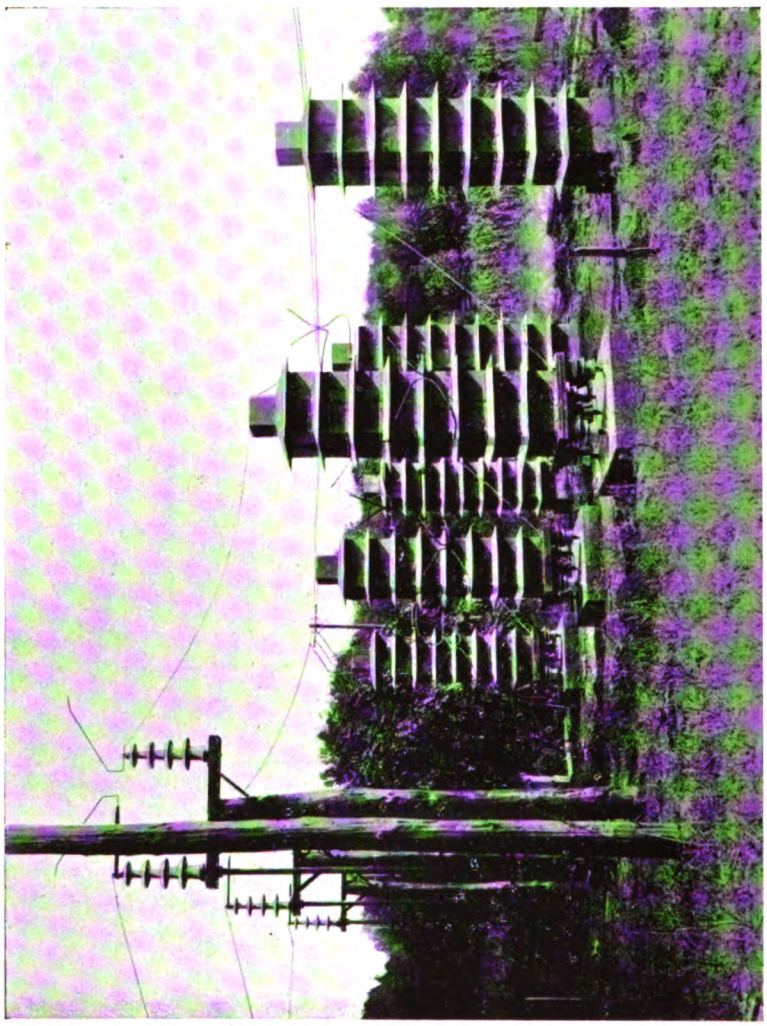


Fig. 17.
100,000 Volt Concrete Column Arrester.

Digitized by Google

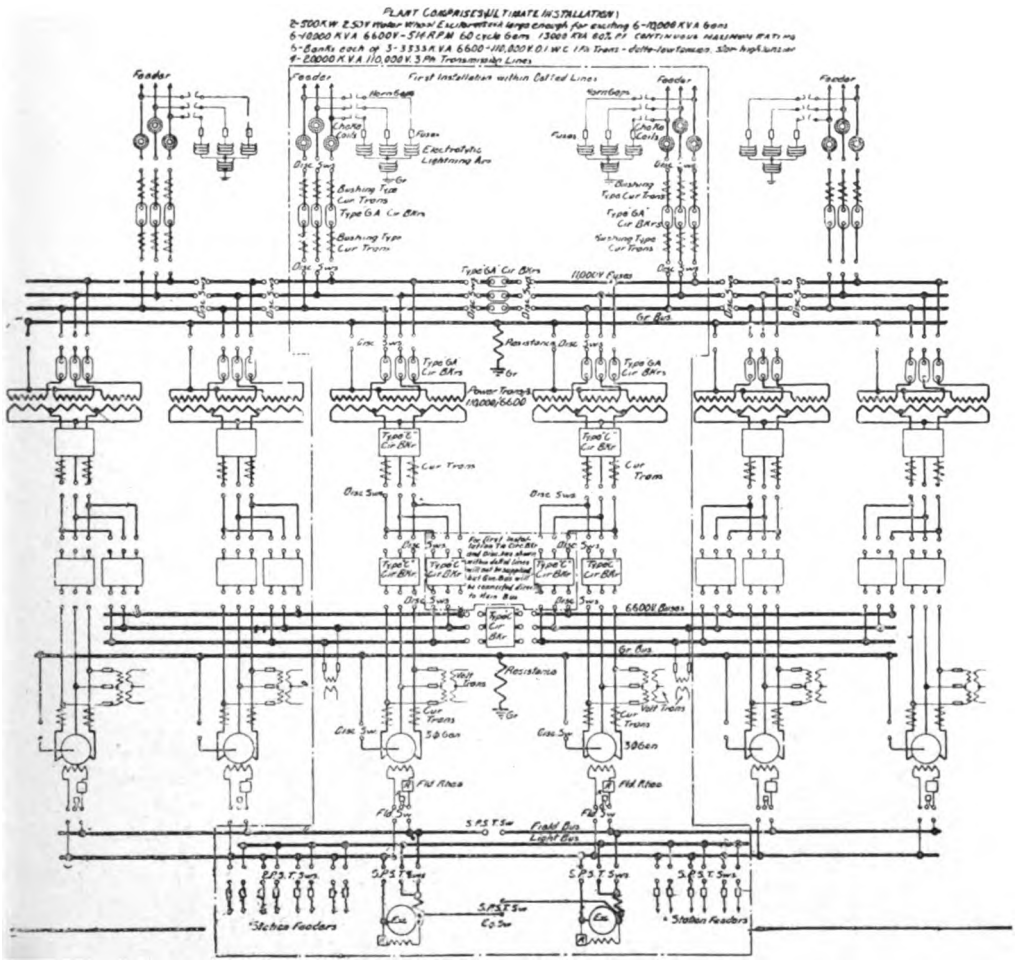


Fig. 18.

Diagram of Connections 60,000 KVA 110,000 Volt Station.

Digitized by Google

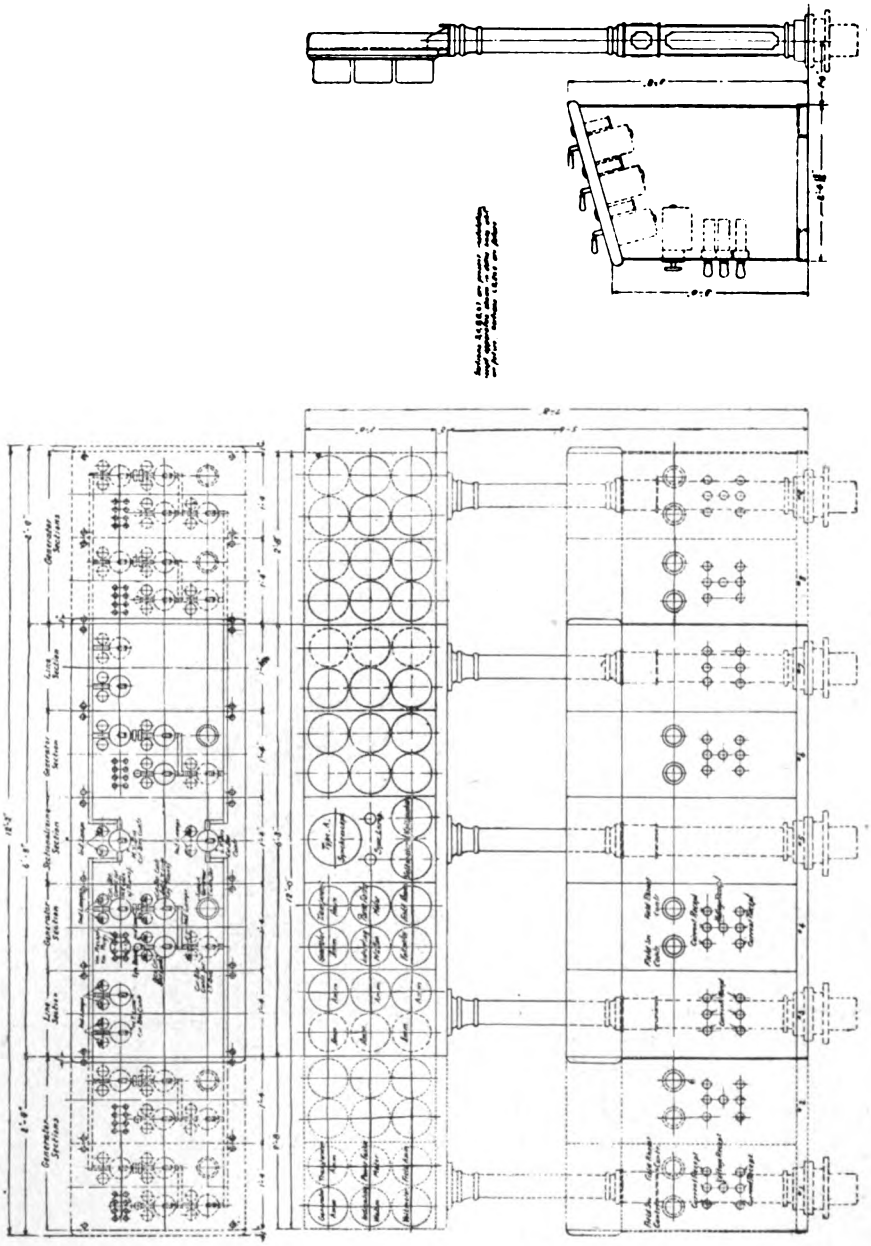


Fig. 19.
Control Desk for 60,000 KVA 110,000 Volt Station.

Digitized by Google

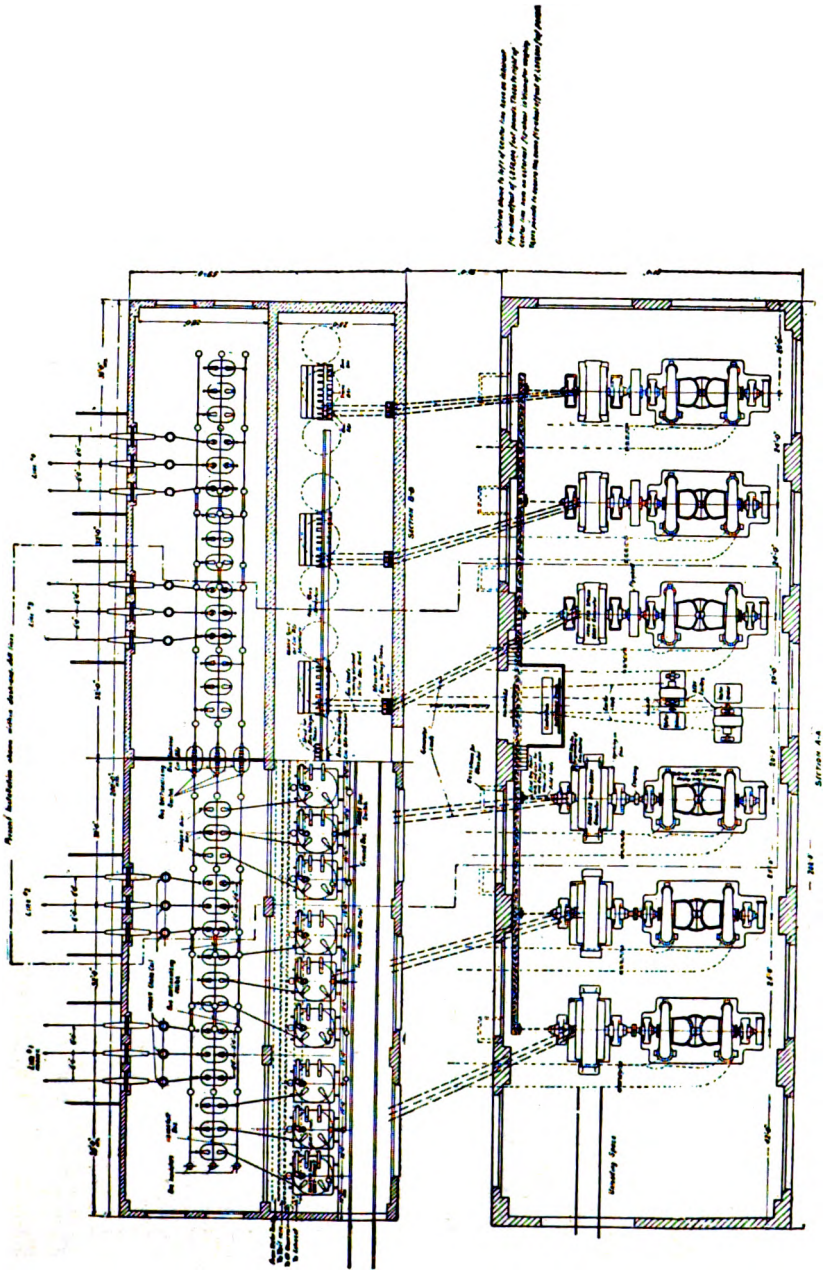


Fig. 20.

Pian View of 60,000 KVA. 110,000 Volt Station.

Digitized by Google

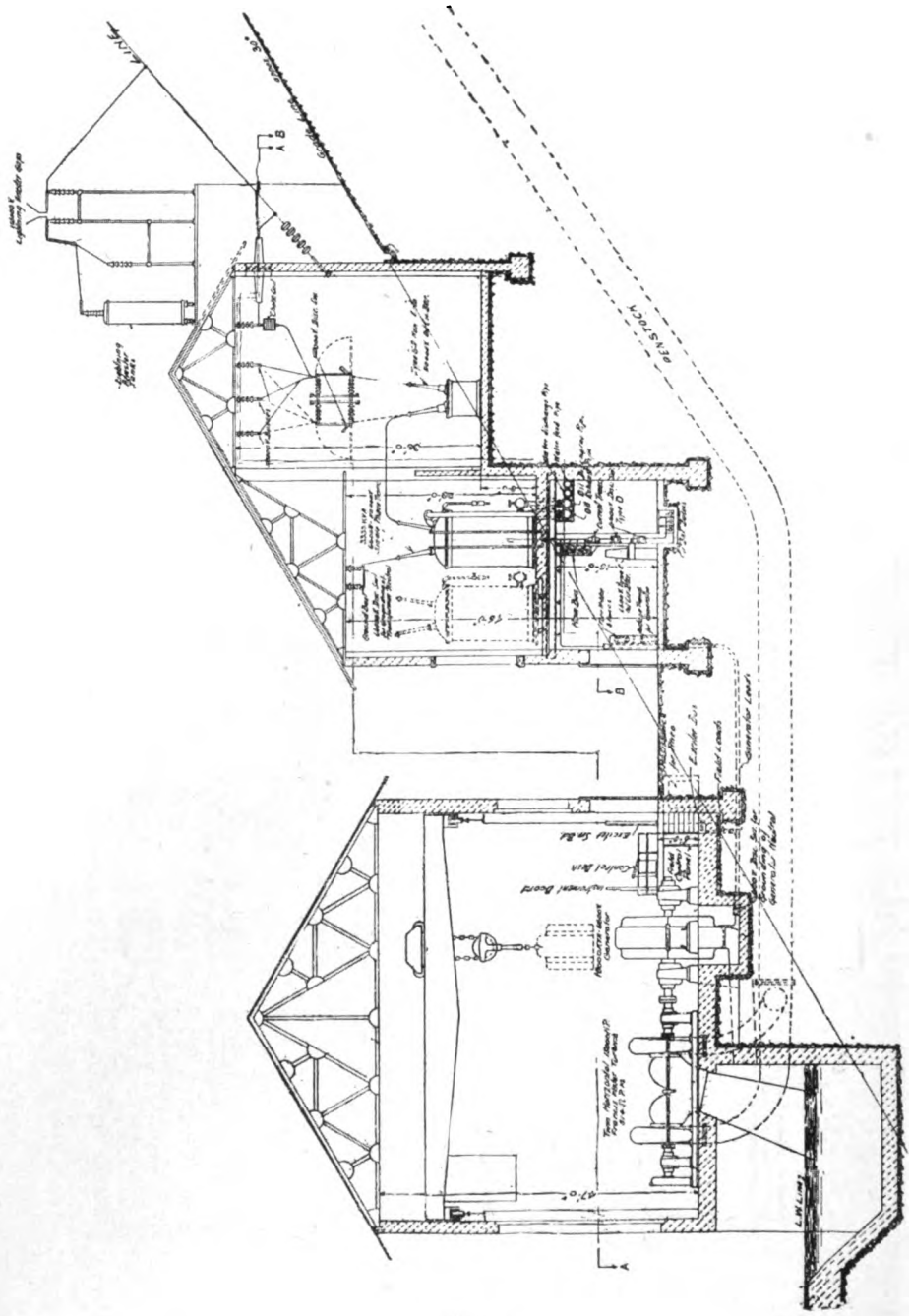


Fig. 21.

Sectional View of 60,000 KVA. 110,000 Volt Station.

Digitized by Google

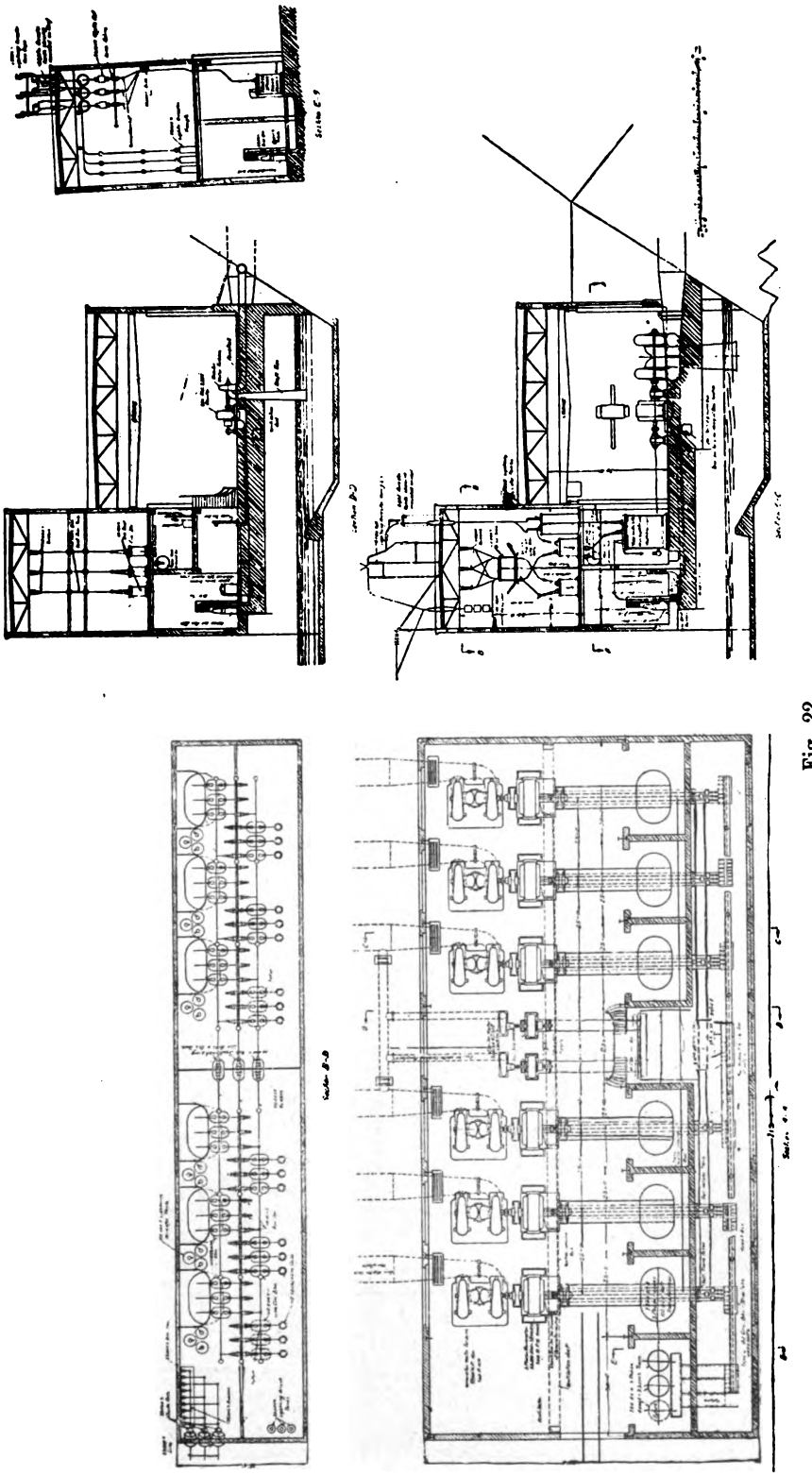


Fig. 22.

Plan & Sections 110,000 Volt Stations with 3-Phase Transformer.

Digitized by Google

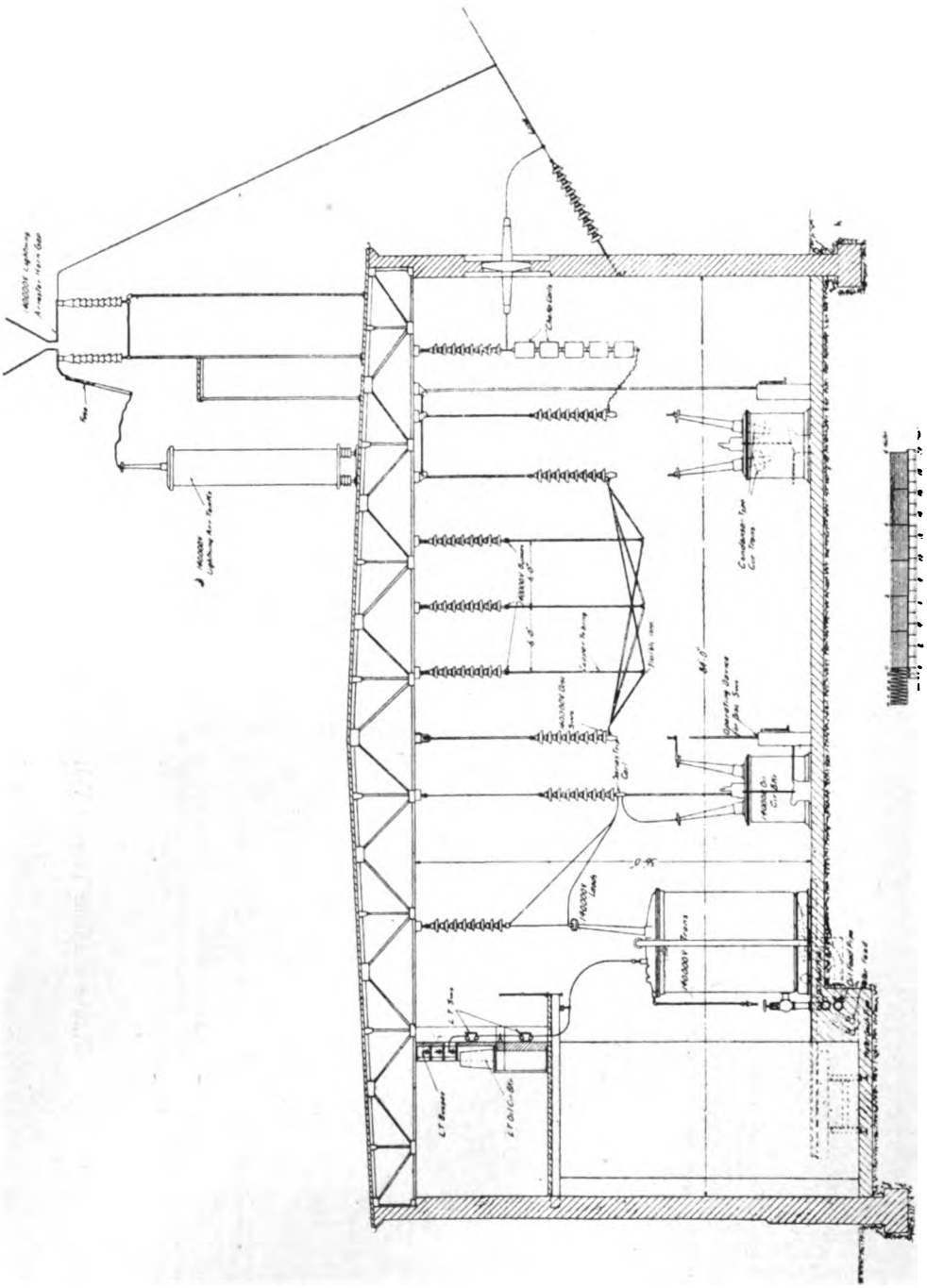


Fig. 23.
Arrangement 140,000 Volt Indoor Station.

Digitized by Google

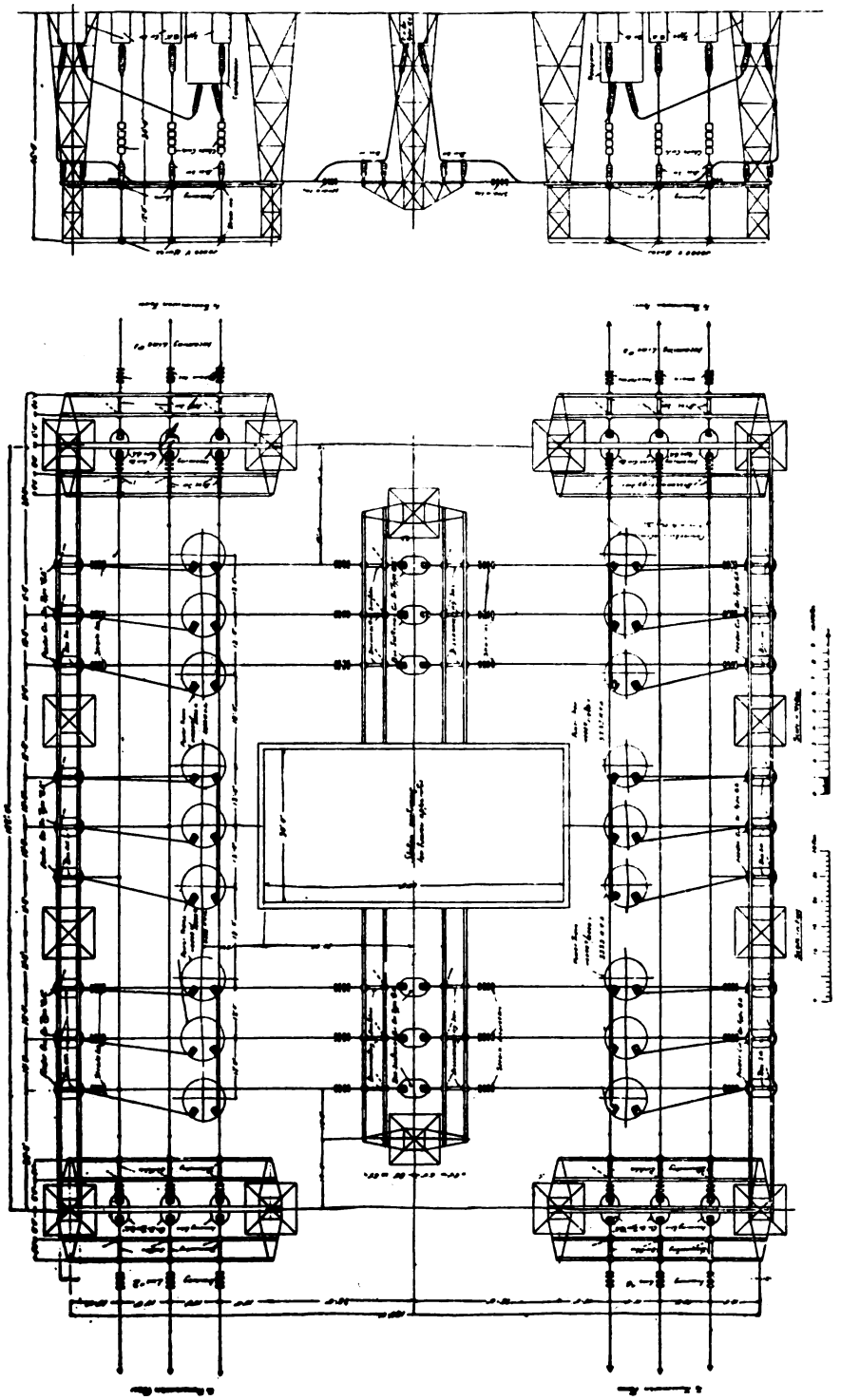


Fig. 24.
Arrangement 110,000 Volt Outdoor Station.

Digitized by Google

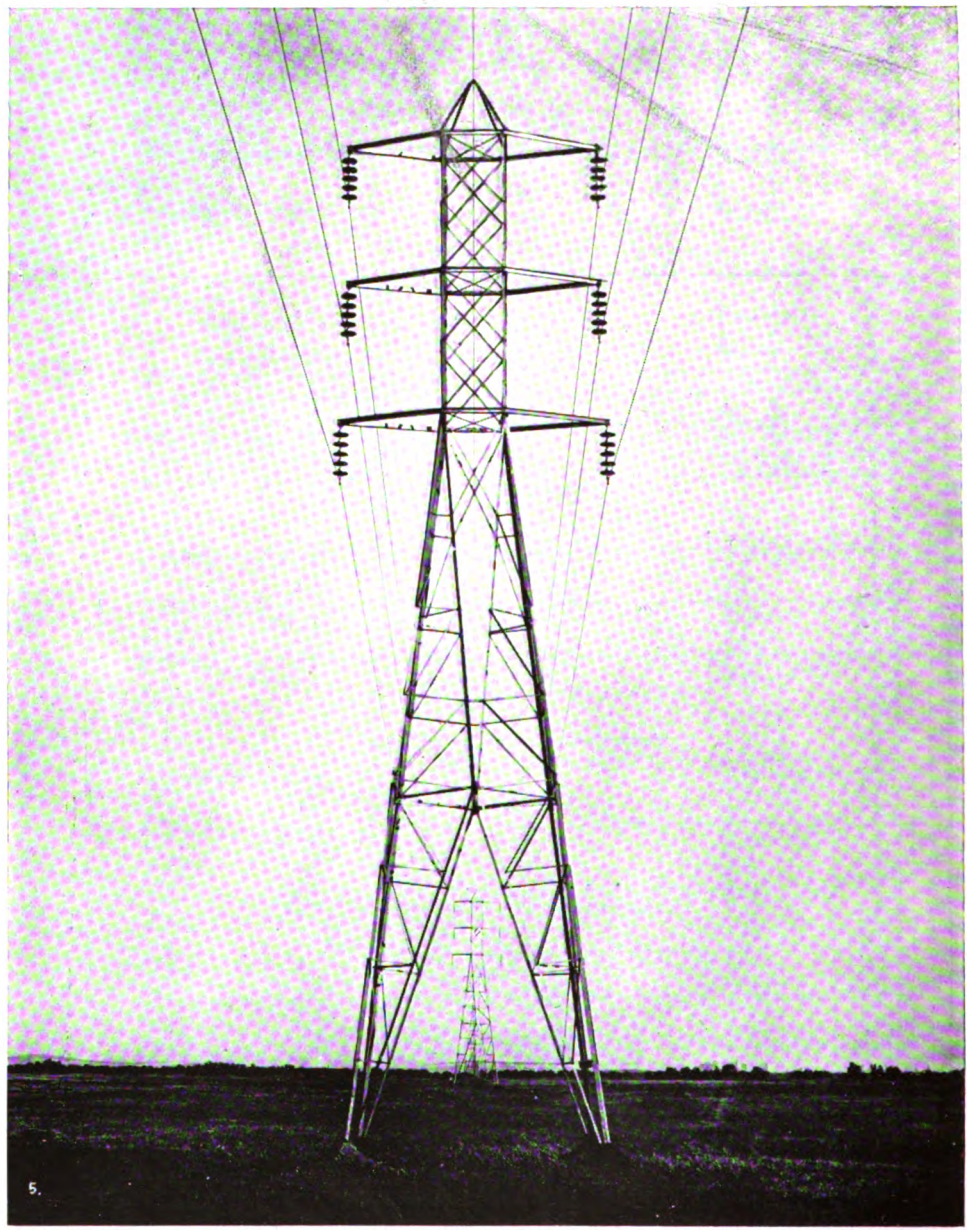


Fig. 25.

100,000 Volt Transmission Tower. — Great Western Power Company.

Digitized by Google

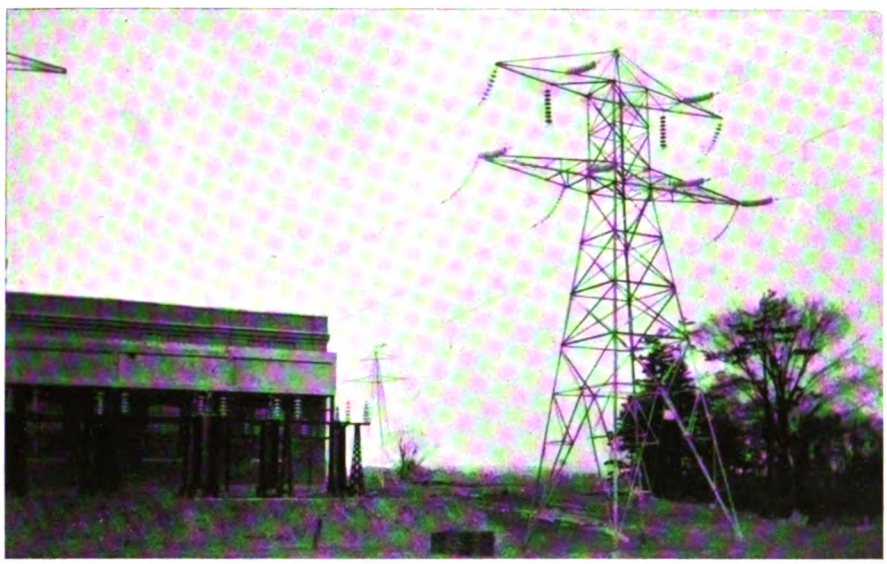


Fig. 26.

Transmission Tower Hydro-Electric Power Commission.

Digitized by Google

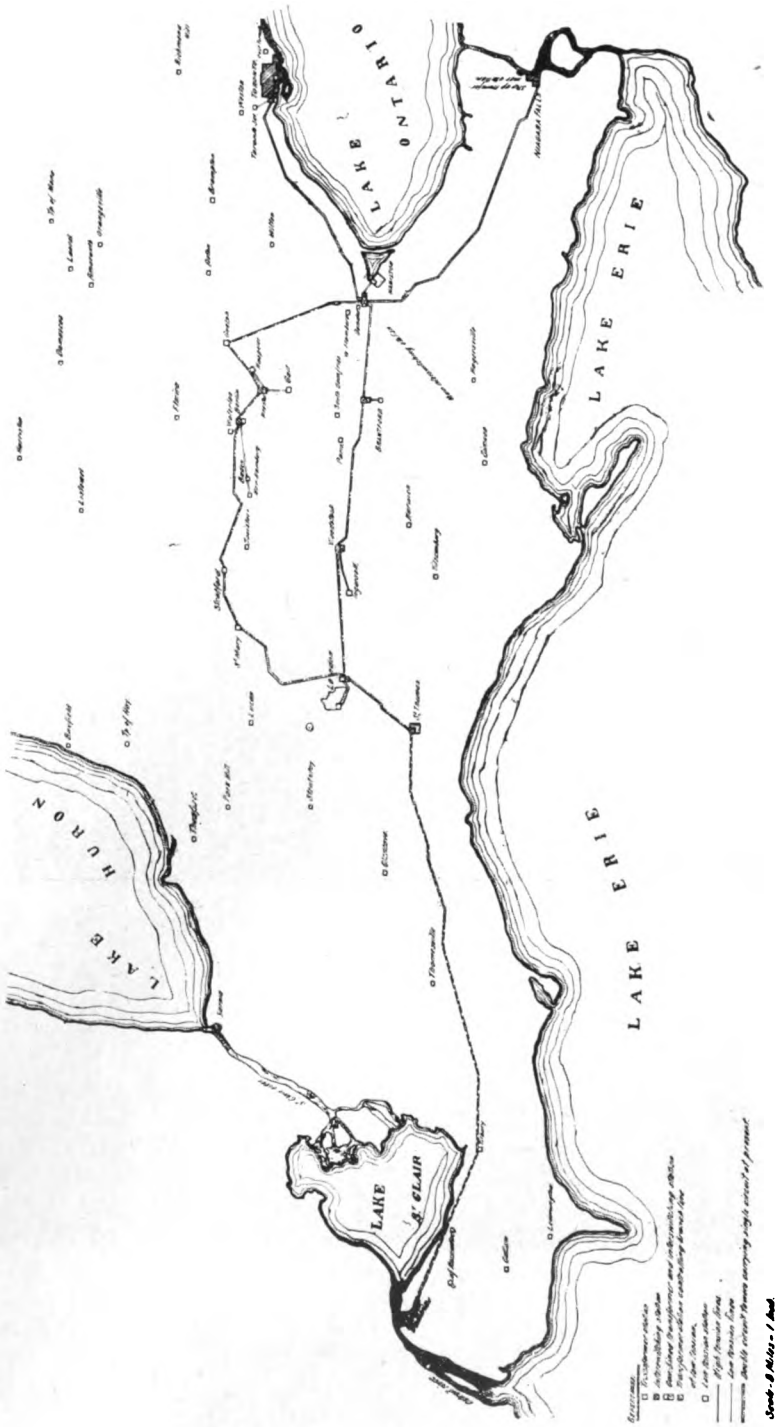


Fig. 27.
Map of Hydro-Electric Power Commission of Ontario.

Digitized by Google

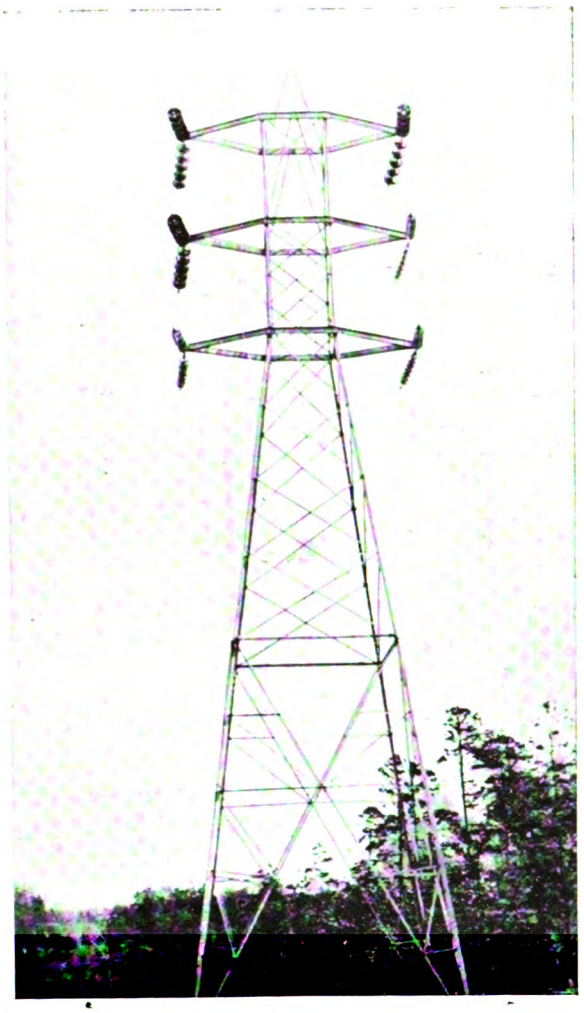


Fig. 28.

Transmission Tower Southern Power Co.

Digitized by Google

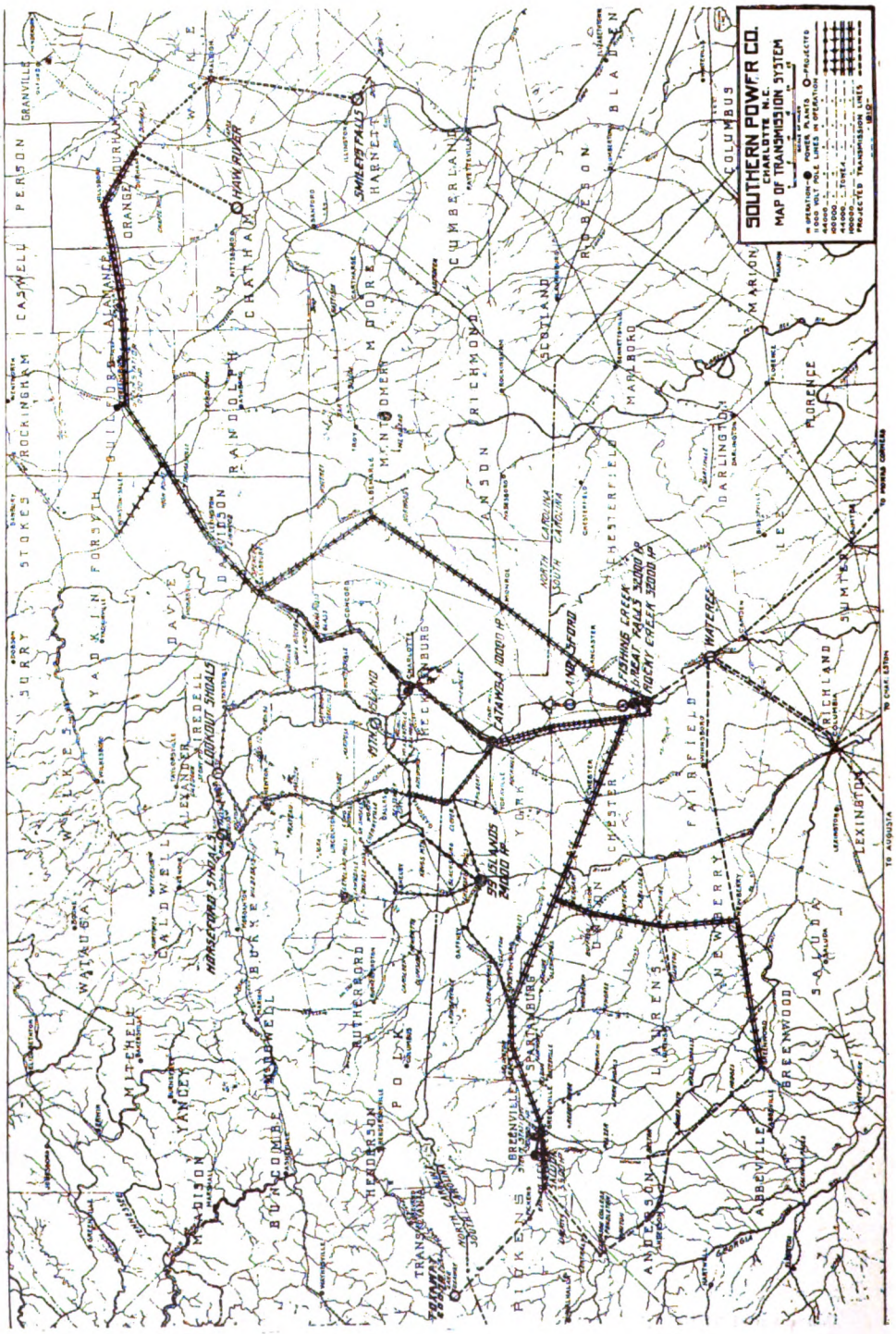


Fig. 29.

Map of Southern Power Co. System.

Digitized by Google

De la construction et de l'emploi des interrupteurs automatiques.

Rapporto sul tema N. 7 del Congresso.

Relatore M. E. RAGONOT (Asnières - France)
Ingénieur en chef du Service d'appareillage
de la Société Industrielle des Téléphones.

Définitions.

Les interrupteurs automatiques sont des appareils destinés à assurer le bon fonctionnement d'un réseau de distribution d'énergie électrique, en éliminant automatiquement les portions de circuit, en tête desquelles ils sont montés, dès qu'un dérangement quelconque ou une fausse manœuvre vient de s'y produire.

Dans l'étude forcément très sommaire que nous allons faire de ces appareils nous essayerons de mettre en évidence les points communs à tous les interrupteurs de construction moderne, appareils qui sont encore assez loin de présenter un aspect uniforme.

On peut tout d'abord distinguer deux classes d'interrupteurs: les interrupteurs à rupture dans l'air et ceux à rupture dans l'huile ou un liquide isolant.

La première de ces catégories ne renferme plus, sauf quelques exceptions dont nous parlerons plus loin, que les interrupteurs pour basse et moyenne tension, jusqu'à 1.500 volts

Digitized by Google

par exemple, et en particulier les interrupteurs pour courant continu.

La deuxième catégorie comprend à peu près tous les interrupteurs pour courants alternatifs à haute ou moyenne tension.

Chapitre I.

Interrupteurs à rupture dans l'air.

Ces appareils sont généralement désignés en France sous le nom de disjoncteurs: c'est ce terme que nous emploierons par la suite.

Les formes de disjoncteurs imaginées jusqu'à ce jour varient à l'infini, et il serait fastidieux de les énumérer toutes; nous nous contenterons d'étudier les types actuellement les plus répandus.

Les premiers disjoncteurs véritablement industriels furent construits en Amérique pour la protection des réseaux de tramways. Dans ces appareils, dont les plus connus sont ceux de la General Electric Co., le balai, de forme demi-circulaire, se déplace de bas en haut et vient s'appuyer sur deux blocs de cuivre rouge, dans lesquels sont vissées les prises de courant. L'extinction de l'arc de rupture est produite par un soufflage magnétique, dû à une bobine connectée en série, ou en dérivation, dans le circuit.

Le soufflage magnétique s'exerce uniquement sur les pare-étincelles qui restent un instant en contact après que le balai s'est séparé des plots.

Ce type d'appareil possède encore une grande vogue en Allemagne, où la plupart des constructeurs l'ont adopté; en Amérique, au contraire, ainsi qu'en Angleterre et en France, il est à peu près abandonné; on lui préfère, avec raison, semble-t-il, le type à balai vertical avec rupture sur charbon, imaginé, croyons-nous, par M. Brown, alors ingénieur de la Société Oerlikon, mais qui fut réalisé sous une forme industrielle et vulgarisé par la Westinghouse Co. A ce type appartiennent, par exemple, les disjoncteurs I. T. E. ainsi que les nouveaux types de la General Electric Co. en Amérique, ceux d'Ellison, Ferranti, Moris et Lister en Angleterre, ceux de Vedovelli, Société Industrielle des Téléphones en France, Siemens-Schuckert en Allemagne, ainsi

Digitized by Google

que ceux d'un grand nombre d'autres constructeurs, connus. Notre étude ne portera que sur ce deuxième type, qui se répand chaque jour davantage.

Tous ces disjoncteurs comprennent à peu près les mêmes organes essentiels, organes que nous allons passer successivement en revue.

Contacts. — D'une manière à peu près générale, la pièce de contact mobile est un balai constitué par la superposition d'un grand nombre de feuilles de cuivre ou de bronze phosphoreux; cette pièce s'appuie, quand le disjoncteur est fermé, sur des plots fixes en cuivre ou en laiton.

Les contacts par couteaux et mâchoires ne sont plus utilisés que d'une façon exceptionnelle, et seulement pour des disjoncteurs de faibles dimensions.

L'épaisseur des feuilles de cuivre constituant le balai varie de 0,02 à 2 millimètres suivant les constructeurs. Avec des lames minces et nombreuses le nombre des points de contact est augmenté, par contre la pression en ces points est plus faible, si bien que la résistance totale du joint peut être plus grande : les épaisseurs les plus convenables sont, nous semble-t-il, comprises entre 0,4 et 0,8 millimètres.

Surface de contact. — Les valeurs adoptées pour les surfaces de contact sont très variables : certains constructeurs n'admettent pas plus de 12 ampères par centimètre carré, d'autres, au contraire, admettent jusqu'à 75 ampères. Avec des appareils bien construits, une densité de courant de 25 ampères par centimètre carré conduit à des échauffements très modérés.

La considération de leur surface seule ne suffit pas, d'ailleurs, pour déterminer la valeur des contacts, car il faut faire entrer en ligne de compte la pression des balais sur les plots, ainsi que le soin apporté à l'usinage.

La valeur de la pression par unité de surface joue un rôle dont la courbe ci-dessous montre l'importance (fig. 1).

On voit que lorsque la pression passe de 0,2 à 1 kilog. par centimètre carré la chute de tension varie de 14 à 7 millivolts; lorsque la pression dépasse 1 kilog. la chute de tension augmente à nouveau : ce résultat, paradoxal au premier abord, est dû simplement au fait que les lames les plus courtes viennent, pendant que le balai s'écrase, s'appuyer contre les lames situées au-dessus d'elles et finissent pas les soulever comme le montre la fig. 2.

Digitized by Google

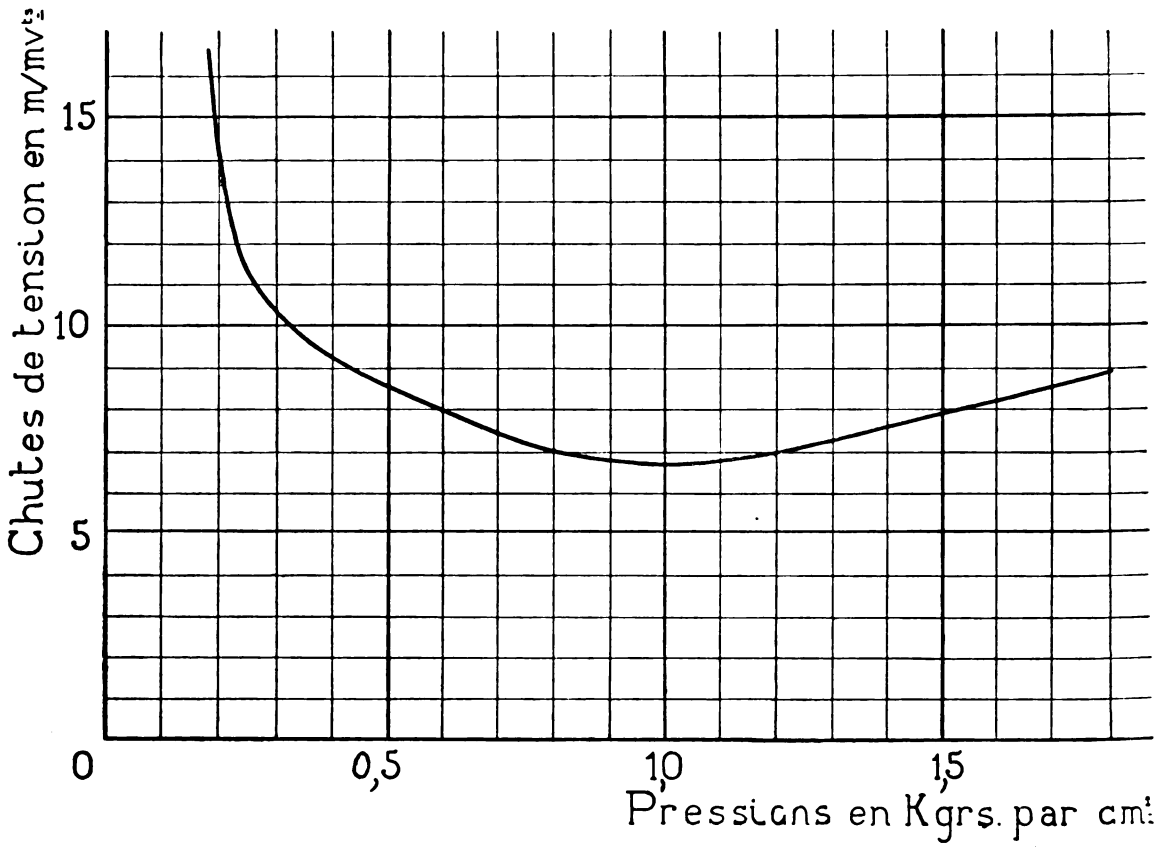


Fig. 1.

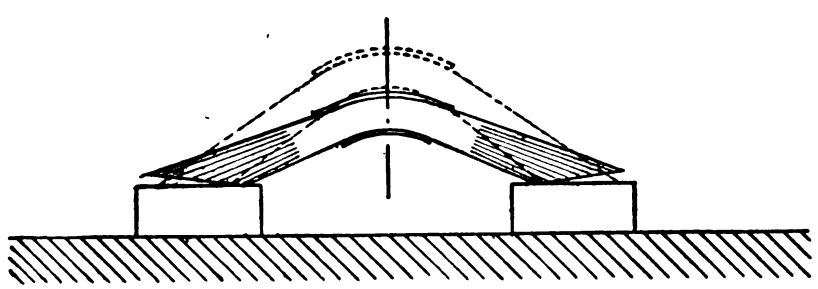


Fig. 2.

Digitized by Google

Certains constructeurs emploient des balais dont les extrémités s'appuient normalement aux surfaces de contact; cette disposition évite le soulèvement des lames extrêmes, mais par contre diminue l'élasticité du balai, ce qui peut compromettre la conservation du contact, si le moindre jeu se produit dans les pièces mécaniques.

Certains cahiers des charges spécifient que les disjoncteurs doivent présenter une densité déterminée de courant par centimètre carré de surface: cette limitation nous semble excessive, car, suivant la construction, une même densité de courant conduit à des échauffements bien différents. Il n'existe qu'un seul procédé rapide et précis pour déterminer la valeur des contacts, c'est de mesurer la chute de tension correspondante au passage d'un courant d'intensité égale à l'intensité nominale, pour laquelle le disjoncteur est vendu. Dans un appareil bien construit cette chute de tension mesurée de plot à plot peut être inférieure à 10 millivolts.

Prises de courant. — Dans la plupart des disjoncteurs les prises de courant sont constituées par des tiges en cuivre rouge filetées et vissées dans les plots.

Les connexions entre les prises de courant et les barres générales sont faites, au moins dans les appareils pour fortes intensités, par un certain nombre de barres méplates serrées, suivant le système américain, entre des écrous plats vissés sur la tige.

Ce dispositif donne de bons résultats lorsque les faces des écrous sont bien dressées et que le serrage est énergique; mais pour les tiges filetées de grand diamètre, les dimensions des écrous deviennent telles que le frottement sur leurs faces est considérable et qu'il est difficile d'obtenir un serrage convenable. D'autre part le contact entre la tige filetée et le plot peut quelquefois laisser à désirer.

Il semble préférable, pour les appareils de forte intensité, d'utiliser des prises de courant rectangulaires, sur lesquelles les connexions sont serrées au moyen de boulons ordinaires en acier.

Les gros disjoncteurs de la Société Ferranti sont munis de prises constituées par un certain nombre de barres méplates, séparées par des cales de même épaisseur, qui sont rivées et soudées sur les plots. La Société Industrielle des Téléphones à

Digitized by Google

Paris utilise à partir de 1.500 ampères des prises de courant en cuivre rouge, forgées d'une seule pièce avec le plot.

Le seul inconvénient de la prise de courant rectangulaire réside dans le supplément de travail nécessaire pour l'exécution des trous de passage dans les panneaux de marbre.

Mécanisme de fermeture et d'accrochage. — Lorsque l'intensité est faible, on peut construire des disjoncteurs dont la fermeture est obtenue par la pression de la main sur le levier qui porte le balai: le levier est maintenu dans cette position par un crochet qui, en cas de surcharge, se trouve soulevé par un organe approprié et laisse le balai revenir à sa position d'ouverture sous l'action d'un ressort de rappel.

Au-dessus de 300 ou 400 ampères la pression à exercer devient trop grande et il faut recourir à des mécanismes disposés de manière à réduire l'effort à une valeur convenable.

La pression à exercer peut être assez considérable; ainsi dans un disjoncteur de dix mille ampères cette pression peut être évaluée à environ 1.000 kilogs; néanmoins, si le mécanisme est bien construit, un disjoncteur de cette dimension peut être fermé facilement à la main.

Déclanchement libre. — Depuis quelques années un certain nombre de constructeurs munissent leurs disjoncteurs d'un dispositif de fermeture, tel que le déclanchement peut se produire bien que l'on maintienne la main sur le levier de manœuvre.

Ce dispositif comprend généralement deux crochets, dont l'un sert à l'entraînement du levier porte-balai, tandis que l'autre est destiné à retenir le levier de manœuvre dans la position de fermeture: c'est sur le premier de ces crochets qu'agit l'armature mobile qui produit le déclanchement.

Ce dispositif est en somme très simple et son emploi est recommandable, le léger supplément de prix qui en résulte est largement compensé par une augmentation de sécurité dans la manœuvre.

Dispositifs d'extinction de l'arc. — Pour protéger le balai contre les brûlures, l'extrémité supérieure du levier qui le porte est munie de pièces, généralement en charbon graphitique, qui, lorsque le disjoncteur est fermé, s'appuient sur des pièces analogues fixées à la partie supérieure du plot.

L'extinction de l'arc est due, d'une part à son allongement rapide obtenu par le déplacement du levier, d'autre part à la convection de l'air échauffé par son passage, enfin, et surtout,

Digitized by Google

au soufflage magnétique exercé par le champ créé par l'arc lui-même.

Dans ces disjoncteurs la coupure est notablement plus lente que dans ceux à soufflage magnétique, et l'arc en s'allongeant avant de se rompre, introduit une résistance de valeur croissante, qui atténue dans une large mesure les effets de self-induction.

Pour que les pare-étincelles soient efficaces il y a tout intérêt à augmenter leur nombre, et par suite la largeur du balai, de manière à diminuer l'épaisseur de l'arc en le répartissant sur une plus grande surface; il semble que beaucoup de constructeurs méconnaissent ce principe.

Aux pare-étincelles en charbon on adjoint généralement des pare-étincelles métalliques, le plus souvent en cuivre rouge: la nécessité de ces pare-étincelles est justifiée par la grande résistance ohmique du charbon. La chute de tension qui se produit dans les charbons pendant le temps très court où ils ont à supporter la totalité du courant, peut être assez grande pour laisser un arc s'amorcer entre le balai et les plots. L'utilité de ces pare-étincelles supplémentaires est toutefois beaucoup plus grande au moment de la fermeture, car, pendant cette manœuvre relativement lente, il arrive que les premières lames qui viennent toucher le plot ont à supporter un courant excessif, suffisant pour les recuire et même les brûler; ces pare-étincelles doivent donc être assez massifs pour supporter momentanément ce courant.

Certains constructeurs n'utilisent pas de pare-étincelles en charbon: les disjoncteurs de la Société Siemens-Schuckert, par exemple, sont munis de deux séries de pare-étincelles, les premiers en métal anti-arc et les deuxièmes en laiton; l'arc s'amorce entre ces derniers qui ont la forme de cornes massives de faible longueur.

L'angle d'ouverture et la longueur du balai varient notablement suivant les constructeurs; il semble inutile de dépasser une vingtaine de centimètres comme distance de coupure, car, grâce au soufflage magnétique dont nous avons déjà signalé l'influence, l'extinction de l'arc semble être d'autant plus rapide que l'intensité est plus grande. D'autre part la diminution de l'ouverture rend la manœuvre moins dure et diminue le choc qui se produit au déclanchement, choc capable dans certains disjoncteurs de grandes dimensions, de briser les panneaux en marbre.

Dispositif de déclanchement. — Pour obtenir le soulèvement, à

Digitized by Google

une intensité déterminée, du crochet qui retient le disjoncteur fermé, la plupart des constructeurs ont recours à des dispositifs électro-magnétiques, par exemple un solénoïde dans lequel se déplace un noyau en fer, ou bien une bobine munie de pièces polaires qui attirent une palette en fer doux.

Les bobines sont parfois placées sur le côté du disjoncteur (Thomson), parfois en-dessous (I. T. E. Ferranti), mais le plus souvent à l'intérieur même du carter en fonte (Westinghouse, Société Industrielle des Téléphones, Vedovelli, etc.).

Dans la plupart des disjoncteurs américains ou français on utilise uniquement le poids de l'armature mobile pour équilibrer l'action magnétique: le réglage du déclanchement est obtenu, soit par variations de l'entrefer, soit par le déplacement d'un contrepoids, soit plus rarement par des poids additionnels. L'armature mobile est complètement indépendante du crochet, elle ne le rencontre qu'à la fin de sa course au moment où sa force vive est la plus grande ainsi que l'attraction magnétique; la précision du déclanchement ne dépend donc nullement des frottements qui peuvent s'exercer sur le crochet.

Dans beaucoup d'appareils allemands, l'entrefer est maintenu constant et le réglage est obtenu au moyen d'un ressort qui agit sur l'armature mobile et dont on fait varier la tension.

Le premier système paraît plus sûr; mais, pratiquement, le deuxième procédé se montre aussi bon, à condition, bien entendu, que l'action du ressort soit telle que son affaiblissement, ou même sa rupture, ait pour effet d'abaisser l'intensité de déclanchement. Avec un ressort il est plus facile d'obtenir des graduations étendues avec divisions sensiblemeut équidistantes.

Dispositifs spéciaux. — Il existe quelques disjoncteurs, dont le déclachement est obtenu sans l'emploi de dispositifs électro-magnétiques. On pourrait citer par exemple les disjoncteurs thermiques de Ferranti dans lesquels l'allongement d'un fil métallique, parcouru par le courant, est utilisé pour dégager le crochet d'enclanchement; ce dispositif original a pour avantage de différer automatiquement le déclanchement d'un temps qui diminue quand la surcharge augmente; nous en reparlerons plus loin à propos des relais à action différée.

La Societé Brown-Boveri a breveté assez récemment un disjoncteur dans lequel on utilise la répulsion qui s'exerce entre deux portions d'un circuit parcouru par un même courant; nous ignorons si elle construit couramment ce genre d'appareil.

Digitized by Google

Disjoncteurs à action différée. — Tandis que pour les disjoncteurs à haute tension le déclanchement différé est très usité, il n'y a que peu de constructeurs qui aient songé à le prévoir pour ceux à basse ou moyenne tension. Les raisons d'utiliser des systèmes retardateurs sont pourtant les mêmes dans les deux cas. Nous pensons que cette anomalie est due simplement à une difficulté de construction: en effet, tandis que la plupart des interrupteurs à haute tension sont commandés par des relais indépendants, les disjoncteurs à basse tension sont munis de dispositifs de déclanchement directs sur lesquels il est plus difficile d'agir.

C'est en Angleterre, croyons-nous, que l'on rencontre le plus grand nombre de disjoncteurs à action différée: un des appareils les plus intéressants et les plus répandus est le retardateur du système Statter. Cet appareil est constitué très simplement par un disque horizontal en laiton qui est fixé par son centre à la partie inférieure du noyau de déclanchement; ce disque, rodé avec soin, repose au fond d'un cylindre en laiton recouvert d'une légère couche d'huile. Lorsque le noyau est attiré par le solénoïde, le disque forme en quelque sorte ventouse et empêche le soulèvement du noyau, pendant un temps qui dépend de la viscosité de l'huile et du diamètre du disque: il est remarquable que ce temps est très constant pour une surcharge déterminée; le retard ainsi obtenu peut dépasser 2 ou 3 minutes.

Un autre retardateur anglais, basé sur un principe analogue, est dû à M. G. Ellison: dans cet appareil le disque est remplacé par un piston très légèrement conique qui se déplace dans un cylindre également conique, à moitié plein d'huile. En faisant varier la position du cylindre par rapport au piston, on augmente ou on diminue la distance annulaire qui sépare ces deux pièces, et par conséquent le passage offert à l'huile: on règle ainsi la valeur du retard.

La Société Alsacienne à Belfort a pris un brevet pour un retardateur tout à fait analogue à celui de Statter, mais dans lequel le disque circulaire est remplacé par un disque en forme de 8; ce disque s'appuie sur un bossage plan de même forme occupant le fond du cylindre. On obtient la variation du retard en faisant tourner le cylindre autour de son axe, de manière à modifier la surface de contact.

Dans les appareils que nous venons de décrire, l'action retardatrice s'exerce pendant une course très faible du noyau, de

Digitized by Google

sorte que la surcharge disparaissant, le noyau ne risque pas de continuer sa course ascendante, comme dans les dispositifs où la variation de l'entrefer est notable.

Indépendamment de ces systèmes de retardateurs on utilise aussi quelquefois des relais à action différée analogue à ceux qu'on emploie pour la haute tension: tels sont par exemple ceux de Ferranti, constitués par une sorte de roue de Barlow tournant dans une cuve à mercure, ou ceux de la General Electric Co. formés d'un solénoïde avec dash-pot à air.

Disjoncteurs à commande à distance. — Dans certains cas, les disjoncteurs sont manœuvrés à distance; on utilise pour cela soit des commandes mécaniques, soit des commandes électriques. Les commandes mécaniques permettent de placer les disjoncteurs soit à l'arrière, soit au-dessus des tableaux de distribution, de manière à soustraire le personnel aux parcelles de métal fondu ou de charbon incandescent qui sont souvent projetées assez loin au moment du déclanchement. Cette disposition est très recommandable pour les panneaux de traction, lorsque la tension dépasse 500 volts.

Les commandes électriques, malgré les services qu'elles pourraient rendre, sont encore assez peu usitées. Les disjoncteurs à soufflage magnétique, à balai horizontal, se prêtent bien à la commande par électro-aimant (disjoncteurs A. E. G.). La Société Brown-Boveri utilise cependant pour ce genre de disjoncteurs le même système de commande par servo-moteurs, qu'elle emploie avec ses interrupteurs pour haute tension; ce système conduit, nous semble-t-il, à une complication bien inutile.

Les électro-aimants s'appliquent également aux disjoncteurs à balai vertical: dans ce cas l'électro-aimant est placé au-dessous du disjoncteur et son noyau est simplement relié par une bielle au levier de manœuvre.

Certains constructeurs ont réuni l'électro-aimant et le disjoncteur en un seul appareil de dimensions assez réduites. Ces appareils ne renferment généralement pas de bobines de déclanchement, ce sont plutôt de simples contacteurs (Gen. Electric Co., Vedovelli, etc.). Pour utiliser ces appareils comme disjoncteurs il faut les combiner avec des relais qui coupent le circuit de l'électro-aimant de fermeture en temps opportun. La marine anglaise utilise uniquement des appareils de ce genre, munis de soufflage magnétique et enfermés dans des boîtes étanches en tôle d'acier; les commandes de tous les disjoncteurs, opérées

Digitized by Google

par boutons poussoirs, sont centralisées sur des panneaux de dimensions réduites.

Emplois des disjoncteurs à basse tension.

Disjoncteurs à maxima. — Les coupe-circuits fusibles d'un fonctionnement suffisamment précis et sûr pour les courants faibles, présentent de graves inconvénients dès que l'intensité dépasse quelques centaines d'ampères. Même pour des intensités faibles il y a des cas fort nombreux, où les fusibles ne sont pas pratiques: c'est, d'une manière générale, lorsqu'il s'agit de protéger des moteurs soumis à de grandes variations de charge ou placés entre les mains de conducteurs peu soigneux ou inexpérimentés. C'est en particulier dans la traction électrique que les disjoncteurs ont trouvé tout d'abord le plus d'applications; actuellement on tend à multiplier leur emploi pour la protection des moteurs d'ateliers, d'appareils de levage, etc. Pour ces différentes applications il est préférable de munir les disjoncteurs de retardateurs, ce qui permet de les régler assez bas pour que les moteurs soient protégés contre des surcharges prolongées, tout en laissant une certaine latitude pour les démarrages.

Certaines Sociétés de distribution d'électricité utilisent des disjoncteurs à maxima pour limiter le courant consommé par leurs abonnés à forfait; pour cette application il est nécessaire d'employer des retardateurs très précis; on utilise parfois des appareils à mouvement d'horlogerie.

Disjoncteurs à minima. — Les disjoncteurs à minima sont utilisés soit pour la protection des batteries d'accumulateurs, soit beaucoup plus souvent pour ouvrir le circuit d'un moteur quand la tension du réseau qui l'alimente vient à manquer. On peut pour cette deuxième application employer soit des bobines à minima de courant, soit des bobines à minima de tension; l'emploi des premières tend plutôt à disparaître, car d'une part il est souvent nécessaire de les armer à la main, c'est-à-dire d'amener au collage l'armature mobile, d'autre part lorsque le moteur subit de grandes variations de charge, et qu'il entraîne des machines ou des transmissions présentant beaucoup d'inertie, il arrive fréquemment que ces disjoncteurs déclanchent intempesti-

Digitized by Google

vement. Les disjoncteurs à minima de tension ne présentent pas ces inconvénients.

Lorsque les disjoncteurs à minima de tension sont utilisés sur des réseaux bi- ou triphasés, on pourrait être tenté de les munir de deux bobines de déclanchement à minima, de manière à provoquer leur ouverture au cas où la tension viendrait à manquer sur une phase seulement; certains constructeurs mêmes cataloguent ces appareils: or, il est facile de se rendre compte que la deuxième bobine ne sert absolument à rien, car tant que la tension subsiste sur une seule phase, le moteur, soit qu'il tourne encore, soit qu'il s'arrête par suite d'un excès de charge, maintient la tension sur les phases coupées et par conséquent le disjoncteur ne déclanche pas (la chute de tension qui se produit dans ce cas, ne dépasse généralement pas 15 %, ce qui est insuffisant pour provoquer le déclanchement). Pour pallier à cet inconvénient la plupart des constructeurs munissent les disjoncteurs d'une bobine à minima de tension et de deux bobines à maxima d'intensité, ce qui assure la protection dans tous les cas. M. G. Ellison a breveté un dispositif ne comportant qu'une seule bobine à maxima insérée dans le rotor: ce dispositif est intéressant, parce que le courant du rotor augmente sensiblement plus que celui du stator, quand une phase est coupée; le disjoncteur peut alors être réglé pour déclancher au moment où la tension vient à manquer sur une des phases.

Disjoncteurs à minima polarisés. — Pour certaines applications spéciales les disjoncteurs à minima de tension ne sont pas utilisables, la charge d'accumulateurs, par exemple. On peut alors employer avec avantage les disjoncteurs à minima polarisés, c'est-à-dire des disjoncteurs dans lesquels on adjoint à l'enroulement série normal, un deuxième enroulement connecté en dérivation.

Ces appareils offrent l'avantage de pouvoir être réglés entre des limites assez éloignées et pour des valeurs positives ou négatives du courant. Ils sont en outre d'un fonctionnement très sûr, car, au moment où le courant s'inverse, le flux passe nécessairement par zéro et par conséquent l'armature mobile ne peut pas rester collée.

Disjoncteurs à retour de courant. — Les disjoncteurs à retour de courant sont disposés de manière à déclancher lorsque le courant qui les traverse vient à s'inverser. Ils doivent être utilisés toutes les fois que plusieurs sources de courant distinctes,

Digitized by Google

génératrices, batteries d'accumulateurs, arrivées de feeders, etc., débitent en parallèle sur les mêmes barres générales. Leur but est d'éliminer automatiquement celle de ces sources dont la force électromotrice, par suite d'une cause quelconque, vient à baisser au-dessous d'une valeur déterminée.

La plupart des disjoncteurs à retour de courant sont tout simplement des disjoncteurs à maxima auxquels on a ajouté un enroulement shunt qui produit un flux de sens inverse de celui de l'enroulement série. Les appareils ainsi construits sont des disjoncteurs à maxima polarisés.

Ces appareils déclanchent dans deux cas: d'abord quand le courant s'inverse et qu'il atteint une intensité égale en valeur absolue à 10 %, par exemple, de son intensité normale, mais aussi en courant direct quand l'intensité devient assez forte, mettons par exemple une fois et demie le courant normal.

Ces disjoncteurs ne résolvent qu'imparfaitement le problème posé: supposons, en effet, qu'un court-circuit se produise sur un feeder de départ, immédiatement les disjoncteurs de toutes les génératrices en parallèle déclancheront à maxima en même temps que celui du feeder lui-même; ce déclanchement aura lieu pour une intensité d'autant plus basse que la tension se trouvera plus réduite par le court-circuit.

Pour éviter cet inconvénient, il faut exiger des constructeurs des appareils qui ne déclanchent qu'en cas de retour de courant et non à maxima. Beaucoup de cahiers des charges en Angleterre renferment cette clause.

Pour réaliser cette condition il faut que les deux enroulements, série et shunt, agissent chacun sur un circuit magnétique distinct; ce sont les attractions ou les répulsions qui se manifestent entre ces deux circuits qu'on utilise pour assurer le déclanchement. Les disjoncteurs à retour de courant de la firme si connue I. T. E. sont construits sur ce principe. La Société Industrielle des Téléphones vient de prendre un brevet pour un dispositif basé sur un blocage du noyau de déclanchement au moyen d'un aimant permanent, blocage qui cesse aussitôt que le courant s'inverse dans le disjoncteur. Ce dispositif présente l'avantage de ne pas être influencé par la chute de tension qui accompagne généralement une inversion de courant.

Une application intéressante des disjoncteurs à retour de courant pourrait être faite aux réseaux de tramways. Le plus souvent ces réseaux sont subdivisés en un certain nombre de sec-

Digitized by Google

tions alimentées chacune par un feeder particulier. On hésite généralement à relier ces sections entre elles, car, si un court-circuit vient à se produire sur un des feeders, tous les disjoncteurs de la centrale déclanchent, et on ne peut les refermer que lorsque le feeder endommagé a été éliminé du circuit. On conçoit que, lorsque le réseau est étendu, la recherche du feeder avarié peut exiger un temps considérable, puisque l'on est obligé d'ouvrir successivement tous les sectionneurs placés aux points d'alimentation.

En remplaçant ces sectionneurs par des disjoncteurs à retour de courant, cette opération se ferait automatiquement et instantanément.

Il faut, bien entendu, que ces disjoncteurs ne déclanchent jamais en courant direct, même en cas de court-circuit, et de plus que leur fonctionnement soit absolument indépendant de la tension.

Disjoncteurs divers. — On peut combiner sur un même appareil les différents modes de déclanchement décrits ci-dessus. Le procédé le plus usité consiste à prévoir plusieurs circuits magnétiques distincts, dont les armatures mobiles agissent séparément sur le crochet d'enclanchement au moyen d'une liaison mécanique appropriée.

La plupart des disjoncteurs à minima et à maxima simultanés sont construits de la sorte.

On peut aussi munir le disjoncteur d'une seule bobine alimentée par des relais convenables : le procédé le meilleur dans ce cas est de prévoir dans le disjoncteur une bobine à minima de tension, dont le courant est coupé par celui des relais qui entre en action. C'est le procédé utilisé par la Société Sprecher et Schuh dans ses disjoncteurs blindés.

Indépendamment des disjoncteurs que nous venons de décrire il existe un grand nombre d'appareils qui sont à proprement parler des interrupteurs automatiques. Tels sont par exemple les limiteurs d'intensité utilisés par certains réseaux de distribution pour leurs abonnés à forfait ; les commutateurs pour enseignes lumineuses. Tels sont aussi par exemple ces petits appareils que l'on vient de lancer en Angleterre pour remplacer à la fois les interrupteurs et les fusibles dans les installations domestiques : le " Thames Automatic Tumbler „ de M. Denny par exemple.

Bien que beaucoup de ces appareils présentent des dispositifs

Digitized by Google

ingénieux et parfois d'une grande originalité, nous n'avons pas cru devoir nous en occuper ici, car ils nous ont paru sortir du programme tracé par la Commission du Congrès.

CHAPITRE II.

Interrupteurs à huile.

Les interrupteurs à huile sont utilisés d'une manière à peu près générale sur tous les circuits à courants alternatifs où la tension atteint ou dépasse 500 volts.

Les interrupteurs à rupture sur cornes sont cependant encore employés assez fréquemment sur les lignes aériennes à tension modérée, à cause de leur simplicité et du bon marché de leur construction; mais, sauf d'assez rares exceptions, ils ne sont jamais munis de dispositifs de déclanchement automatiques; on les utilise donc plutôt comme sectionneurs que comme interrupteurs.

Les interrupteurs à huile présentent par rapport aux anciens appareils des avantages de toutes sortes: d'abord une diminution considérable de volume; s'il fallait avec des interrupteurs à rupture sur cornes couper les puissances que l'on rencontre communément dans les centrales modernes, il faudrait au moins quadrupler les dimensions des bâtiments. Une photographie parue dans le numéro de Mars 1911 de la " General Electric Review „ représente un arc obtenu en coupant à l'air libre 800 ampères sous 13.000 volts; la longueur de cet arc est d'environ 4 m. 60 et sa hauteur au-dessus des pièces métalliques, entre lesquelles il jaillit, est de plus de 3 mètres: dans l'huile l'arc, obtenu avec la même puissance, n'a pas plus de 23 centimètres de longueur.

Grâce à leur encombrement réduit et au fait qu'ils ne donnent lieu à aucun arc extérieur, les interrupteurs à huile peuvent être placés en un point quelconque de l'usine, même dans des salles de machines à proximité des moteurs ou des génératrices à haute tension qu'ils commandent.

Un autre avantage des interrupteurs à huile consiste dans la façon dont ils produisent l'extinction de l'arc sans donner lieu aux surtensions dangereuses que l'on l'observe quelquefois au moment du fonctionnement des interrupteurs à cornes. Ce

Digitized by Google

bon fonctionnement des interrupteurs à huile est dû à ce que dans ces appareils l'arc s'éteint presque toujours dès la première alternance, c'est-à-dire au moment même où le courant s'annule: de nombreux oscillogrammes, relevés sur un grand nombre de réseaux, montrent très nettement ce fait. Il peut arriver cependant que l'arc après s'être éteint une première fois se rallume encore, au moment où la tension repasse par son maximum, si l'armature nobile n'a pas eu le temps de s'éloigner des contacts, d'une distance supérieure à celle qui correspond à la distance d'éclatement dans l'huile. Ce phénomène doit être assez rare, nous ne l'avons jamais observé personnellement; cependant des oscillogrammes relevés à la General Electric C. montrent qu'il se produit quelquefois lorsque les puissances à couper sont grandes; nous croyons qu'il n'aurait pas lieu avec des interrupteurs à ruptures multiples.

Les interrupteurs à huile, par contre, ne conviennent pas du tout pour le courant continu. Dans ce cas la coupure est toujours accompagnée d'une carbonisation profonde de l'huile; cette différence d'effet s'explique par ce fait que, dans le cas du courant continu, l'arc se prolonge assez longtemps dans le milieu semi-conducteur constitué par la vapeur d'huile mélangée de noir de fumée et de particules métalliques. Sous l'action de cet arc les pièces métalliques constituant les pare-étincelles se rongent très rapidement, des dépôts charbonneux se forment sur les pièces de contact, provoquent leur échauffement et leur mise hors service rapide.

(Ces phénomènes se produisent également dans les contrôleurs à bain d'huile: nous avons vu des appareils de ce genre dont il fallait renouveler constamment les pièces de contact, jusqu'au jour où l'on s'est décidé à supprimer les bacs à huile; depuis cette époque les contacts se maintiennent en bon état bien que l'on n'ait pris aucune des précautions usitées pour les contrôleurs dans l'air, telles que soufflage magnétique ou pare-étincelles. Ces contrôleurs servent à la mise en route et au réglage de moteurs de 50 chevaux sous 500 volts commandant des presses rotatives.)

Ce fait est admis d'une manière à peu près générale; les quelques constructeurs qui prévoient l'emploi d'interrupteurs à huile en courant continu conseillent tout au moins l'usage d'appareils de dimensions beaucoup plus grandes que ceux qui conviendraient, à puissance égale, dans le cas de courants alternatifs.

Digitized by Google

Quand on étudie les différents modèles d'interrupteurs actuellement sur le marché on s'aperçoit qu'ils peuvent se répartir à peu près tous entre deux types généraux.

Le premier de ces types, qu'on pourrait désigner sous le nom de " type américain „, se caractérise par les points suivants:

1° Deux ruptures seulement par pôle, même pour les tensions et les puissances les plus élevées.

2° Grande course de l'armature mobile (25 à 50 centimètres).

3° Volume d'huile aussi restreint que possible.

4° Cuves séparées même pour les interrupteurs de faible puissance.

5° Emploi du bois imprégné comme support isolant de l'armature mobile.

Par suite même des grandes courses prévues la partie mécanique de l'interrupteur est toujours assez importante; elle est généralement placée au-dessus du couvercle de l'appareil. Dans les interrupteurs de grandes dimensions les cuves à huile sont enfermées dans des cellules entièrement closes et la partie mécanique est installée sur la cloison horizontale en maçonnerie qui surmonte les cellules; la liaison entre les deux parties de l'interrupteur est constituée par des pièces en bois. On reconnaîtra facilement à cette description les interrupteurs de la General Electric, Westinghouse, Ferranti, etc.

L'autre type pourrait être qualifié de type " suisse ou allemand „; il diffère très notablement du type précédent; ses caractéristiques sont les suivantes:

1° Ruptures multiples par pôle: le nombre de ruptures variant de 2 à 8 suivant la puissance et la tension.

2° Faible course de l'armature mobile, 8 à 15 centimètres en moyenne, même pour les tensions les plus élevées.

3° Volume d'huile important.

4° Cuve unique pour les interrupteurs multipolaires de petites et moyennes puissances et tensions.

5° Emploi exclusif de la porcelaine comme isolant.

Dans la plupart des cas, grâce à la faible course de l'armature mobile, le mécanisme peut être placé entièrement à l'intérieur du bâtis de l'interrupteur; l'aspect de l'appareil est par suite très simple et bien dégagé.

Les interrupteurs Brown-Boveri, Siemens, A. E. G., Luigi Magrini, etc., par exemple, rentrent dans cette catégorie.

Il existe évidemment un grand nombre d'interrupteurs n'ap-

Digitized by Google

partenant complètement ni à l'une ni à l'autre de ces classes, mais la plupart en dérivent et constituent une sorte de compromis entre les deux types, par exemple ceux d'Oerlikon, Alioth, Société Industrielle des Téléphones, Sprecher & Schuh etc.; il en existe très peu qui utilisent des dispositifs vraiment originaux; nous aurons l'occasion de reparler de ces derniers par la suite.

Nous allons, comme nous l'avons fait pour les disjoncteurs à basse tension, examiner rapidement les différents organes constituant l'interrupteur à huile moderne.

Contacts. — Contrairement à ce qui a lieu pour les disjoncteurs à basse tension, beaucoup de constructeurs évitent l'emploi des balais feuilletés; les contacts sont généralement constitués par des pièces coniques ou pyramidales, le plus souvent en laiton, qui pénètrent dans des mâchoires formées par un certain nombre de pièces massives également en laiton, montées sur des ressorts: ce mode de construction est utilisé aussi bien en Amérique qu'en Europe.

Ces contacts sont robustes et supportent bien l'arc de rupture, par contre ils occasionnent fréquemment une chute de tension assez notable et leur construction devient délicate quand il s'agit de supporter des intensités élevées au-dessus de 4 à 500 ampères par exemple.

On peut se demander pourquoi les contacts à balais qui donnent de si bons résultats pour les disjoncteurs à basse tension, ne sont pas plus utilisés. Contrairement à l'opinion courante, le frottement des lames sur les plots, qui se produit pendant la fermeture, est largement suffisant pour chasser la couche d'huile qui empêcherait un bon contact.

Nous avons fait de nombreux essais à ce sujet, en mesurant à sec, puis dans l'huile, la chute de tension aux bornes de contacts ainsi constitués et nous n'avons jamais pu trouver de différence appréciable.

Certains constructeurs, d'ailleurs des plus connus, emploient des balais feuilletés dans l'huile; nous pourrions citer, par ex., la Société Brown-Boveri, la Société Industrielle des Téléphones, etc. Certains constructeurs même, qui utilisent des cônes pour de faibles intensités ont recours aux balais lorsque l'intensité devient trop grande.

Pour tirer un bon parti des balais feuilletés il est indispensable de les protéger au moyen de pare-étincelles robustes, de préférence en cuivre rouge.

Digitized by Google

Il arrive très fréquemment que l'imperfection des contacts se trouve masquée grâce au bon refroidissement dû à la propagation de la chaleur dans la masse d'huile, et à sa dissipation par les parois des cuves. Pour être valables les essais d'échauffement doivent être faits quand les contacts sont à l'air libre. Il vaut mieux encore procéder comme nous l'avons indiqué pour les disjoncteurs à basse tension, c'est-à-dire mesurer la chute de tension correspondante au passage du courant. Quand l'interrupteur supporte le courant d'intensité normale, cette chute de tension, mesurée à l'extérieur du bac entre les prises de courant, doit être inférieure à 25 ou 30 millevolts.

Dispositifs de fermeture et d'accrochage. — Ces dispositifs sont très variés, mais la plupart d'entre eux comportent comme organes essentiels, une bielle et une manivelle disposées un peu comme dans les disjoncteurs à basse tension. Dans les appareils à faible course, la bielle est fixée directement à l'armature mobile; dans ceux à grande course le mouvement est généralement amplifié par un système de leviers disposés de manière à assurer le déplacement rectiligne de la tige qui supporte les contacts mobiles.

Dans presque tous les appareils bien construits ce dispositif est agencé de manière à réduire à une valeur très minime l'effort nécessaire pour maintenir l'interrupteur fermé: de cette manière le crochet d'enclanchement peut être de dimension réduite, et assez léger pour qu'un choc même faible suffise à le dégager.

Dans la plupart des interrupteurs modernes l'ouverture du circuit est obtenue par la chute de l'armature mobile; cette chute est parfois accélérée par l'action d'un ressort.

Ce système est d'un fonctionnement très sûr, mais il a l'inconvénient de donner une rupture un peu lente; on peut l'améliorer notablement en prévoyant des pare-étincelles à très longue course, disposés de façon que la coupure ne se produise qu'après une certaine longueur de chute, et par conséquent lorsque l'armature mobile a déjà pris une certaine accélération.

La Société Westinghouse, par exemple, emploie dans ce but des pare-étincelles à pistons.

Nous ne connaissons pas d'exemples de pare-étincelles à rupture brusque analogues à ceux des interrupteurs de tableaux, nous croyons cependant que des dispositifs de ce genre favoriseraient beaucoup l'extinction rapide de l'arc.

Il existe certains appareils où l'armature mobile est rappelée de bas en haut par l'action d'un ressort, tels sont par exemple

Digitized by Google

les interrupteurs type H de la General Electric Co.; dans d'autres, la rupture a lieu dans un plan horizontal, dans les interrupteurs Kelmann par exemple; dans certains appareils enfin, la coupure est obtenue par la rotation d'un couteau dans un plan horizontal, comme dans l'interrupteur à 100.000 volts exposé à Turin par la Société Industrielle des Téléphones.

Ces différents dispositifs ont l'avantage de procurer une rupture plus rapide que ceux du premier type.

Prises de courant. — D'une manière tout-à-fait générale les prises de courant sont constituées par des pièces en porcelaine creuses servant à la fois à supporter le plot de contact et à donner passage au conducteur.

Dans beaucoup d'interrupteurs de l'école américaine les connexions sont faites en câble isolé; le câble revêtu de son isolant, pénètre à travers la porcelaine et vient se fixer sur le plot lui-même dans l'huile; cette disposition est rendue nécessaire par la présence des pièces mécaniques situées à proximité des sorties.

Dans les interrupteurs de l'école suisse ou allemande, au contraire, le dessus des appareils étant complètement dégagé, les connexions, en barre nue, s'attachent à la partie supérieure des porcelaines.

Il semble que ce deuxième procédé est meilleur, car on peut craindre que les matières combustibles constituant l'isolant du câble ne puissent, en certains cas, aider à la propagation des incendies.

Tant que la tension ne dépasse pas 24 à 30.000 volts les isolateurs sont généralement entièrement en porcelaine; pour des tensions plus élevées il est d'usage d'adjoindre à la porcelaine des isolants divers. La porcelaine est probablement le meilleur des isolants dont dispose l'industrie: lorsqu'elle est parfaite elle résiste à 100.000 volts sous une épaisseur de 2 centimètres seulement. Dans la pratique la porcelaine présente souvent des défauts et on se trouverait conduit, pour conserver une marge de sécurité suffisante, lorsqu'il s'agit de très hautes tensions, à lui donner une épaisseur incompatible avec une bonne cuisson. On pourrait pour éviter cet inconvénient employer plusieurs tubes de porcelaine concentriques; on préfère généralement constituer les tubes intérieurs d'une matière différente, le plus souvent de papier imprégné. Souvent ces tubes dépassent le niveau supérieur de la porcelaine; quelquefois, ils sont recouverts d'une deuxième porcelaine renversée, destinée à les protéger de

Digitized by Google

l'humidité; ce dernier procédé est utilisé par la Société Brown-Boveri.

Une autre disposition, qui donne de bons résultats, consiste à utiliser des porcelaines de grand diamètre remplies d'huile.

On pourrait, peut-être avec avantage, remplacer l'huile par une matière isolante, analogue à celle qu'on utilise dans les boîtes d'extrémité de câble, et constituée, par exemple, de paraffine, résine et vaseline en proportions convenables.

Certains constructeurs américains ont complètement renoncé à l'emploi de la porcelaine pour les interrupteurs à très haute tension: les sorties de la General Electric Co., par exemple, sont constituées par une série d'anneaux, en carton spécial, de faible hauteur, séparés les uns des autres par des disques minces en même matière, de plus grand diamètre; la pièce métallique centrale de forte section est filetée à chaque extrémité et munie de rondelles et d'écrous qui permettent de serrer les anneaux fortement les uns contre les autres. Le cylindre isolant ainsi constitué est ensuite rempli d'huile. Pour accroître encore la sécurité, l'intervalle compris entre la tige centrale et le cylindre est cloisonné au moyen d'un certain nombre de tubes concentriques également en carton.

Pour les tensions élevées la Société Westinghouse emploie des sorties du type à condensateurs. Le conducteur central est constitué par un tube en laiton entouré de couches concentriques alternativement isolantes et conductrices, disposées de façon que la répartition de la capacité assure une variation uniforme du potentiel depuis le centre jusqu'à la périphérie. Ce dispositif supprime complètement les effluves entre les bornes de sortie et le couvercle en fonte. Ces sorties sont analogues à celles employées, croyons-nous, pour la première fois, par la Société Siemens et Halske pour les transformateurs à très haute tension.

Dispositifs de déclanchement. — Lorsque les interrupteurs sont placés dans une station centrale leur déclanchement est obtenu le plus souvent par l'intermédiaire d'un électro-aimant à courant continu, dont le circuit est fermé au moment voulu par des relais appropriés. On peut reprocher à ce système une certaine insécurité: en fait, lorsque les contacts des relais sont bien établis — ceux en charbon donnent à cet égard toute satisfaction — et que la source de courant continu est une batterie d'accumulateurs, le fonctionnement ne laisse presque jamais à désirer.

Digitized by Google

Lorsque les appareils sont de dimensions réduites, certains constructeurs relient les bobines de déclanchement directement aux bornes des transformateurs d'intensité: ce dispositif offre une grande sécurité puisqu'il supprime l'aléa des contacts du relais et de la source auxiliaire. Pour obtenir le déclanchement différé il suffit dans ce cas de munir les bobines d'un des dispositifs retardateurs décrits à propos des disjoncteurs à basse tension.

Certains constructeurs encore, Luigi Magrini par exemple, utilisent un dispositif mixte comportant un transformateur muni de deux enroulements secondaires. L'un de ces enroulements, qui alimente la bobine de déclanchement, se trouve normalement court-circuité par un petit interrupteur, soumis à l'action d'un relais, alimenté lui-même par le deuxième enroulement. Ce relais peut, d'ailleurs, être d'un des types quelconques que nous décrirons ci-après. Avec ce système la source de courant ne fait jamais défaut, et l'imperfection du contact ne peut avoir comme effet qu'un déclanchement intempestif de l'interrupteur.

Depuis quelques années beaucoup de constructeurs enfin construisent des disjoncteurs dont les bobines de déclanchement sont directement parcourues par le courant à haute tension. La bobine elle-même est isolée du bâti par un support en porcelaine et son armature mobile, noyau ou palette, est reliée au crochet d'enclanchement par l'intermédiaire d'une tige isolante légère en ébonite, en bois ou en papier imprégné. La bobine de déclanchement peut être remplacée par un dispositif à action différée, à moteur par exemple (Siemens, A. E. G., Brown-Boveri, Luigi Magrini, etc.). Ces différents systèmes sont employés avec avantage dans les postes de transformateurs où l'espace est mesuré et où l'on n'a pas besoin d'appareils de mesure.

Il est intéressant de remarquer que plus la tension est élevée plus il y a intérêt à supprimer les transformateurs d'intensité, qui deviennent des appareils encombrants et très coûteux; il n'y aurait même aucun inconvénient, bien que cela ne soit pas de pratique courante, à utiliser des ampèremètres placés directement dans les circuits à haute tension, à condition, bien entendu, que ces appareils soient montés sur des isolateurs appropriés et protégés d'une manière efficace contre tout contact éventuel. La General Electric Co. a réalisé des installations de ce genre dans des stations à 100.000 volts.

Digitized by Google

La plupart de ces appareils à déclanchement direct ne peuvent pas être réglés sous tension; la Société Industrielle des Téléphones en construit cependant dans lesquels les pièces de réglage fixées au bâti métallique de l'interrupteur sont accessibles, même quand l'appareil est en service.

Fermeture à distance. — Dans toutes les installations de quelque importance les interrupteurs sont, pour des raisons de commodité et de sécurité, placé à des distances souvent assez considérables du point d'où il faut les commander.

Quand la distance ne dépasse pas 3 ou 4 mètres, et que l'interrupteur est petit, on utilise simplement une liaison mécanique entre le levier de manœuvre et l'interrupteur; cette liaison est constituée le plus souvent par des tringles rigides avec renvois de sonnette; certains constructeurs emploient aussi des câbles métalliques et des chaînes passant sur des roues dentées: ce mode de commande est économique et de montage facile, il permet de franchir d'assez grandes distances; il faut seulement avoir soin de monter les câbles de telle façon qu'ils ne puissent jamais venir en contact avec des pièces sous tension, même en cas de rupture; on peut à cet effet les faire passer dans des tubes métalliques.

Suivant les constructeurs la bobine de déclanchement se trouve placée, soit sur le panneau de commande près du levier de manœuvre, soit sur le bâti même de l'interrupteur. Le premier procédé présente, selon nous, l'inconvénient que le jeu qui peut se produire dans les articulations des organes de commande, empêche les pièces de contact de venir correctement en prise; par contre, le levier de manœuvre indique clairement, par sa position, si l'interrupteur est ouvert ou fermé. Le deuxième procédé qui doit être utilisé chaque fois qu'il s'agit d'intensités élevées permet de mieux assurer le contact, mais rend nécessaire l'emploi de lampes de contrôle pour indiquer si l'interrupteur est ouvert ou fermé.

Un autre inconvénient du premier dispositif est, qu'au moment du déclanchement toutes les pièces de commande participent au mouvement d'ouverture de l'interrupteur et par conséquent le retardent notablement, même si l'on a soin de les équilibrer. Dans le deuxième procédé le mécanisme de l'interrupteur, qui doit nécessairement être à déclanchement libre, agit seul sans entraîner les organes de commande à distance.

Lorsque la distance devient trop grande, ou que l'appareil

Digitized by Google

est trop lourd à manœuvrer, on utilise des dispositifs de commande à servo-moteur, soit électriques, soit à air comprimé.

Commande à air comprimé. — Ce mode de commande à distance est probablement le premier qui ait été utilisé pour des interrupteurs de puissance élevée, puisque la Société Westinghouse l'avait appliqué en 1893 pour la manœuvre des interrupteurs des alternateurs de 5.000 HP de la " Niagara Falls Power Co. „.

Par l'emploi de l'air comprimé on peut, avec des appareils relativement simples et peu coûteux, mettre en jeu des efforts considérables.

Par contre, la production de l'air comprimé exige des compresseurs et des réservoirs assez dispendieux. Les pertes de charge dans les conduites sont assez grandes et limitent la distance à laquelle on peut avec avantage employer la commande pneumatique directe, c'est-à-dire avec robinets de manœuvre placés sur les panneaux de commande.

La commande électro-pneumatique permet de franchir des distances beaucoup plus grandes et malgré sa complication elle présente d'assez nombreux avantages pour être préférée dans la plupart des cas.

Un autre inconvénient de l'air comprimé réside dans la difficulté qu'on éprouve à la dessécher convenablement. Il se produit souvent dans les conduites des condensations gênantes, et même dangereuses si l'eau condensée se trouve projetée sur des circuits à haute tension; ce sont ces différents inconvénients qui ont fait abandonner ce mode de commande par la Société Westinghouse.

Il nous semble cependant qu'en prenant quelques précautions on peut éviter ces inconvénients. Certains constructeurs semblent revenir à ce mode de commande: la General Electric Co., par exemple, l'utilise pour ses nouveaux interrupteurs à très haute tension; l'ingénieur Luigi Magrini fait figurer dans son catalogue les organes nécessaires pour l'appliquer aux interrupteurs de sa construction.

Commande électrique. — C'est actuellement la commande électrique qui est de beaucoup la plus utilisée, tous les constructeurs sans exception la préconisent, ils ne sont divisés que dans le choix du moteur, moteur rotatif ou électro-aimant.

La commande par moteur qui s'est généralisée d'abord en Amérique (General Electric Co.) est usitée maintenant par un

Digitized by Google

grand nombre de constructeurs européens; plus particulièrement en Suisse et en Allemagne (Brown-Boveri, Siemens-Schuckert, A. E. G., Luigi Magrini, etc.). Dans presque tous les cas la fermeture de l'interrupteur est obtenue par l'action d'un ressort très puissant, qui est tendu par le moteur, en dehors des périodes de fonctionnement. Ce ressort reste armé tant que l'interrupteur est ouvert et sa détente est produite par l'action d'un petit solénoïde analogue à celui qui provoque le déclanchement.

Les avantages de ce système de commande sont, d'une part la très grande rapidité d'action, d'autre part la faible intensité du courant nécessaire pour alimenter le moteur; par contre, les dispositifs employés sont compliqués et assez coûteux. On peut craindre aussi que le ressort de fermeture ne se fatigue à la longue et ne vienne même à casser: pour répondre à cette dernière objection la Société Brown-Boveri a imaginé un système dans lequel le ressort n'est bandé que quelques instants avant la fermeture; la manœuvre est alors effectuée en deux temps: le premier temps prépare la fermeture, le deuxième l'accomplit.

La commande par électro-aimant est infiniment plus simple, elle offre par conséquent une très grande sécurité. Par contre, son action est généralement un peu lente, ce qui peut présenter un inconvénient pour la mise en parallèle des alternateurs. Cette lenteur est due, d'une part au temps nécessaire pour l'établissement du courant dans la bobine, d'autre part au freinage produit par les courants induits dans le noyau pendant son déplacement. Pour augmenter la rapidité d'action certains constructeurs font agir deux électro-aimants accouplés et prévoient pour ces électros des courses plutôt faibles, 8 à 10 centimètres par exemple. Un système assez répandu consiste à équilibrer une partie des pièces mobiles par un ressort puissant; l'effort nécessaire pour provoquer la fermeture se trouve ainsi notablement diminué, tandis que la rapidité d'ouverture n'est guère influencée, puisque, une fois l'interrupteur enclanché, le ressort récupérateur est complètement détendu. C'est le système employé par exemple par la Société Westinghouse.

On peut aussi diminuer l'influence des courants induits en utilisant des noyaux feuilletés: la Société Ferranti constitue ces derniers par des tubes minces concentriques, fendus suivant une génératrice. Le résultat ainsi obtenu est remarquable, puisque le temps nécessaire pour fermer un interrupteur, ayant une

Digitized by Google

course de 40 centimètres, est, paraît-il, inférieur à $^1/_{50}$ de seconde. Cette rapidité est d'autant plus remarquable que dans cet appareil le noyau de l'électro-aimant étant fixé directement à l'armature mobile, doit parcourir une course égale à celle de cette dernière, soit 40 centimètres. Le temps de fermeture a été mesuré au moyen d' un oscillographe. L'intensité du courant nécessaire à la fermeture est assez grande, elle atteint 100 ampères sous 100 volts pour l'interrupteur tripolaire, à pôles séparés, de 500 ampères, 6500 volts.

Lorsqu'on emploie des commandes par électro-aimant, il est nécessaire de prévoir des commutateurs de manœuvre disposés de manière à supporter les arcs de rupture toujours assez considérables ; on donne souvent à ces appareils la forme de petits contrôleurs.

Certains constructeurs utilisent des électro-aimants à courant alternatif, la Société Française Westinghouse par exemple ; la plupart, cependant, ont reculé devant l'intensité considérable du courant nécessaire pour l'alimentation de ces appareils. Lorsque l'on ne peut disposer d'aucune source à courant continu les commandes à moteur sont généralement seules employées ; la General Electric Co., comme nous l'avons dit plus haut, a pourtant dans ce cas, abandonné l'usage des moteurs électriques pour l'emploi de l'air comprimé.

Le contrôle d'ouverture ou de fermeture de l'interrupteur est obtenu par des lampes de couleur placées sur le panneau de manœuvre. Une lampe rouge indique que l'interrupteur est fermé, une lampe verte qu'il est ouvert. Lorsque la centrale comporte un grand nombre d'interrupteurs il est intéressant de prévoir un dispositif indiquant qu'un de ces appareils vient de déclancher, afin que le surveillant du tableau soit d'un seul coup d'œil averti de cet incident. On peut pour cela prévoir l'allumage d'une troisième lampe ou bien simplement l'extinction ou l'allumage simultané des deux lampes habituelles.

Dimensions des interrupteurs à huile.

La plus grande incertitude a régné jusqu'à présent au sujet des dimensions à donner aux interrupteurs à huile.

Au début de la construction de ces appareils les unités en

Digitized by Google

service dans les usines génératrices étaient de faible puissance et possédaient une grande réaction d'induit; il suffisait de donner aux interrupteurs des dimensions suffisantes pour assurer leur isolement, la capacité de coupure ainsi obtenue était largement suffisante. A l'heure actuelle, depuis l'emploi des turbo-alternateurs principalement, de nombreux accidents ont démontré que cette manière de résoudre le problème était incomplète. Les essais à ce sujet ne sont pas faciles, car les exploitants mettent peu volontiers leur usine à la disposition des constructeurs pour de semblables expériences, si bien que ces derniers sont réduits le plus souvent à s'inspirer des appareils qui, chez leurs voisins, ont donné de bons résultats.

Cet état de choses est préjudiciable aussi bien aux exploitants qu'aux constructeurs eux-mêmes, c'est pourquoi la commission chargée de l'étude des appareils à haute tension de l'Association des Ingénieurs Allemands, s'est-elle chargée récemment d'élaborer un projet de prescriptions pour la construction et les essais des interrupteurs à huile.

Le point capital de ce projet est à notre avis le suivant: dans une centrale, la puissance de coupure de tous les interrupteurs, qu'ils soient placés sur les arrivées des alternateurs, ou sur les départs d'alimentation de gros ou de petits moteurs (même pour les moteurs de la condensation et les transformateurs d'éclairage de l'usine), doit être identique.

Le deuxième point fixé par la commission est la détermination de la puissance maxima que ces interrupteurs auraient à couper en cas de court-circuit: cette puissance une fois déterminée, on peut choisir avec certitude le type d'interrupteur qu'il convient d'adopter. Les règles proposées pour cette détermination sont les suivantes:

a) Pour les interrupteurs placés directement sur les barres de la station centrale, sans intermédiaire de résistances, la puissance du court-circuit à considérer est égale au triple de celle de la station centrale;

b) Pour les interrupteurs séparés des barres par une résistance appréciable, occasionnant une chute de tension de n % en marche normale, la puissance du court-circuit s'obtient en multipliant par $\frac{100}{n}$ la puissance du départ;

c) Pour les interrupteurs placés immédiatement après un transformateur, la puissance de court-circuit s'obtient en mul-

Digitized by Google

tipliant par $\frac{100}{3,3} = 30$ la puissance du transformateur (en admettant une chute de tension de 3,3 $^0/_0$ dans le transformateur);

d) Pour les interrupteurs placés immédiatement après un transformateur dans le primaire duquel se produit une perte de tension de n_1 $^0/_0$ lorsque le transformateur fournit sa puissance normale, la puissance de court-circuit s'obtient en multipliant celle du transformateur par le facteur $\frac{100}{3,3 + n_1}$;

e) Si à la perte n_1 dans le primaire, s'en ajoute une seconde n_2 dans le secondaire, le facteur précédent devient

$$\frac{100}{3,3 + n_1 + n_2};$$

f) Dans les systèmes à double barre on calcule la puissance de court-circuit de l'interrupteur en tenant compte du court-circuit de plus grande puissance, pouvant se produire sur l'un des deux côtés de l'interrupteur;

g) Dans les cas *b* jusqu'à *g* la puissance de court-circuit de l'interrupteur peut être prise égale à la puissance de court-circuit de la station centrale, lorsque celle-ci est inférieure à la puissance de court-circuit calculée pour cet interrupteur.

Le troisième point important du projet est la détermination des cotes principales des interrupteurs susceptibles de couper les puissances ainsi prévues. Ces cotes peuvent être déterminées à l'aide des 2 tableaux reproduits ci-contre:

Digitized by Google

TABLEAU I.

Tension nominale en volts	PUISSANCE DE COURT-CIRCUIT EN K. V. A.										
	2500	5000	7500	10.000	20.000	30.000	40.000	50.000	60.000	90.000	180.000
750	I	„	„	„	„	„	„	„	„	„	„
1500	II	II	II	„	„	„	„	„	„	„	„
3000	II	II	II	II	III	III	„	„	„	„	„
6000	III	III	III	III	III	IV	IV	IV	IV	„	„
12000	IV	IV	IV	IV	IV	IV	V	V	V	V	„
24000	V	V	V	V	V	V	V	VI	VI	VI	VI
35000	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	„	„	„

Les chiffres en caractères romains correspondent aux différents types d'interrupteurs dont les cotes principales sont données dans le tableau ci-dessous:

TABLEAU II.

Séries	Tension d'essai en volts	COTES EN MILLIMÈTRES PARTIES		
		En dehors de l'huile	Dans l'huile	
		a	*b*	*c*
I	5.000	30	30	80
II	10.000	75	50	100
III	20.000	100	50	100
IV	30.000	125	60	120
V	50.000	180	90	180
VI	70.000	240	120	240
VII	100.000	„	„	„
VIII	160.000	„	„	„
IX	220.000	„	„	„
X	300.000	„	„	„
XI	400.000	„	„	„

Digitized by Google

Dans ces tableaux la cote *a* représente :

1° Plus courte distance à la terre ;

2° Distance de 2 phases entre elles ;

3° Distance entre elles de 2 parties différentes d'une même phase.

La cote *b* représente :

1° Plus courte distance à la terre ;

2° Distance de 2 phases entre elles.

La cote *c* représente la hauteur d'huile au-dessus de l'endroit de la rupture.

Ces prescriptions principales sont accompagnées d'un certain nombre de règles précises sur les essais de tension, la détermination de l'échauffement maximum, de l'huile, des bobines de déclanchement, des électro-aimants de fermeture, et enfin sur les marges de réglage à adopter pour le déclanchement.

Comme point particulier le bois n'est pas admis comme isolant.

Discussion. — Malgré son importance, le premier point que nous avons mentionné ne figure dans aucun des articles, il se trouve relégué dans l'annexe parmi les exemples d'applications.

Si la commission n'a pas jugé utile de le mettre davantage en évidence c'est peut-être parce que, depuis longtemps, un certain nombre de constructeurs ont adopté cette manière de faire, dont la nécessité paraît évidente pour peu que l'on y réfléchisse. Beaucoup d'exploitants et même de constructeurs pourtant, auraient besoin de se pénétrer davantage de cette évidence : on peut dire en effet que les centrales équipées suivant ce principe constituent encore une infime minorité. Tout récemment pour la nouvelle centrale de 120.000 kilowatts, actuellement en construction à Paris, un certain nombre de constructeurs, des mieux cotés dans le monde entier, avaient proposé pour les départs des feeders des interrupteurs de dimensions beaucoup plus réduites que ceux destinés aux alternateurs.

Il est à souhaiter que cette règle soit adoptée d'une manière absolument générale, afin de placer les bons constructeurs sur un pied d'égalité, vis-à-vis de leurs concurrents ignorants ou moins scrupuleux.

Détermination de la puissance à couper. — La commission, comme nous l'avons vu plus haut, fixe la puissance maxima à couper au triple de la puissance de la station centrale. Cette détermination nous paraît un peu arbitraire, car s'il est vrai

Digitized by Google

qu'en régime permanent le courant de court-circuit ne dépasse pas le triple du courant normal, on sait, et nous en reparlerons plus loin, qu'au moment du court-circuit cette intensité peut atteindre une valeur bien autrement élevée. Il faudrait, de toute nécessité, fixer du même coup le temps au bout duquel le déclanchement doit se produire. Si le déclanchement doit être instantané la puissance ainsi déterminée serait beaucoup trop faible, elle ne paraît vraisemblable que si le déclanchement est différé de 2 à 3 secondes.

Certains constructeurs commencent à tenir compte de ce fait; la General Electric Co., par exemple, dans une notice datée de décembre 1910 présente un tableau des puissances des installations que peut protéger son interrupteur Type F forme K-3: si le déclanchement est retardé (une seconde $\frac{1}{2}$ au minimum), cette puissance peut être d'environ 5.000 kilowatts; si le déclanchement doit avoir lieu instantanément, la puissance ne doit pas dépasser 2.000 kilowatts. Il s'agit ici de la puissance à pleine charge de l'alternateur, ou des barres générales, sur lequel l'interrupteur est branché.

Il y aurait lieu aussi, croyons-nous, de faire intervenir non seulement la puissance totale des machines installées dans la station centrale, mais encore la puissance individuelle de ces machines. Un court-circuit sur un turbo-alternateur de 10.000 kilowatts, par exemple, est certainement beaucoup plus dangereux qu'un court-circuit sur les barres générales d'une usine comportant 5 alternateurs de 2.000 kilowatts.

Cotes principales. — Voici peut-être le point capital de ce règlement, et c'est ici que le travail de la commission a dû être le plus délicat. Il serait très intéressant de connaître les essais qui ont permis d'établir les tableaux reproduits plus haut.

Quelle que soit la rigueur de la méthode suivie dans les essais en question, il nous paraît toutefois hasardeux de trop généraliser les résultats de ces essais, exécutés selon toute évidence sur un seul type d'interrupteur, ou du moins sur des interrupteurs de construction et de principe analogues.

Si nous essayions par exemple d'appliquer ces chiffres à certains types américains, nous verrions apparaître des différences énormes, principalement en ce qui concerne la cote *b*. Il est bien évident d'autre part que la longueur de coupure, le nombre de points de rupture et enfin la capacité du bac en huile influent

Digitized by Google

considérablement sur la puissance qu'un interrupteur est capable d'interrompre.

Tensions d'essai. — Le tableau II que nous avons reproduit plus haut indique les tensions d'essai auxquelles doivent être soumis les différents types d'interrupteurs. En rapprochant ce tableau du tableau I on s'aperçoit d'une anomalie, singulière à première vue, c'est que la tension d'essai est fonction de la puissance du réseau: ainsi l'interrupteur prévu pour une tension de service de 12.000 volts doit être essayé à 30.000 volts s'il est du type correspondant à 30.000 kilowatts et à 40.000 volts s'il est du type correspondant aux puissances comprises entre 30.000 et 60.000 kilowatts. Dans ce projet de règlement la commission admet que chaque constructeur possède un certain nombre de types d'interrupteurs dont les dimensions et par suite la capacité de coupure sont uniquement déterminées par la tension maxima à laquelle on peut les soumettre en service normal, si bien qu'à chacun des types correspond une puissance et une tension déterminée.

En réalité il peut être, dans certains cas, plus avantageux pour le constructeur de prévoir dans chaque dimension d'interrupteur plusieurs types d'isolateurs, si bien que les tensions d'essais données dans le tableau précité peuvent n'être pas valables. En France les règlements en vigueur prévoient les tensions d'essai suivantes.

Jusqu'à 10.000 volts trois fois la tension de service. Au-dessus de 10.000 volts deux fois la tension de service plus 10.000 volts.

Ce règlement très simple s'applique d'ailleurs à toutes les parties des installations.

CHAPITRE III.

Relais à action différée.

Les relais à action différée peuvent se diviser en deux classes. La première comprend ceux qui donnent un retard diminuant avec la surcharge, la deuxième ceux dont le retard est invariable.

Il n'existe pas, croyons-nous, de règles bien précises pour le choix d'un système plutôt que de l'autre: certains constructeurs emploient exclusivement les relais de la première catégorie, d'autres beaucoup plus rares ceux de la deuxième. Nous croyons cependant que l'on peut formuler la règle suivante:

Digitized by Google

" Toutes les fois qu'il existe plusieurs interrupteurs en série, et que les relais doivent, par conséquent, exercer une action sélective, il faut choisir des appareils à retard constant; dans tous les autres cas les relais à retard variable sont préférables „.

Dans les stations centrales modernes, par exemple, on trouve généralement 3 ou 4 interrupteurs en série, en partant de l'interrupteur général de l'alternateur pour aboutir à l'interrupteur de départ d'un feeder: il est désirable qu'en cas de court-circuit sur un feeder, seul le disjoncteur de ce feeder entre en action; il doit suffire pour cela de régler les relais de façon que les retards aillent en décroissant à partir de l'alternateur jusqu'au feeder. Il semble que rien ne s'oppose à ce que l'on procède de la sorte avec des relais à temps variable: tous les constructeurs munissent en effet ces appareils d'échelles graduées en secondes; en réalité il n'en est rien et beaucoup d'exploitants savent, qu'en cas de court-circuit franc, tous les disjoncteurs ainsi réglés déclanchent en même temps.

En effet, les retards marqués ne correspondent qu'à une surcharge déterminée, 10 % par exemple de l'intensité pour laquelle le relais entre en action: lorsque la surcharge diffère de cette valeur pour laquelle l'appareil est étalonné, le retard varie considérablement; la courbe ci-après (Fig. 3) montre nettement l'allure du phénomène.

On voit que le relais étant réglé pour déclancher au bout de 5 secondes avec 10 % de surcharge agit seulement au bout de 9 secondes si la surcharge n'est que de 5 %; le retard tombe au contraire à 3 secondes quand la surcharge est de 15 % et à $^1/_2$ seconde quand elle est de 100 %.

On voit aussi que si le réglage initial au lieu d'être de 5 secondes, par exemple, pour la surcharge de 10 % avait été fixé à 10 secondes, le déclanchement pour une surcharge de 100 % se produirait au bout d'un temps qui se trouve être pratiquement le même que dans le cas précédent. Il ne faut pas, en effet, tenir compte de la fraction de seconde qui peut séparer la valeur de ces deux retards, car, sous l'action d'une surcharge un peu forte, le disque du relais continue à tourner, même si la surcharge disparaît, pendant un temps assez long pour assurer le contact. On voit donc que lorsque la surcharge est grande le retard est sensiblement indépendant du point de réglage; c'est ce qui explique, qu'en cas de court-circuit tous les disjoncteurs déclanchent en même temps.

Digitized by Google

Quel que soit le type de relais employé, la courbe des retards est sensiblement la même; cette courbe est assez voisine d'une hyperbole équilatère, qu'il s'agisse de relais à dash-pot, à air ou à glycérine, de relais à disque, ou de relais thermiques.

Pour éviter l'inconvénient grave dont nous venons de parler il est indispensable de recourir à des relais donnant des retards indépendants de la surcharge; nous verrons plus loin comment ces relais sont habituellement réalisés.

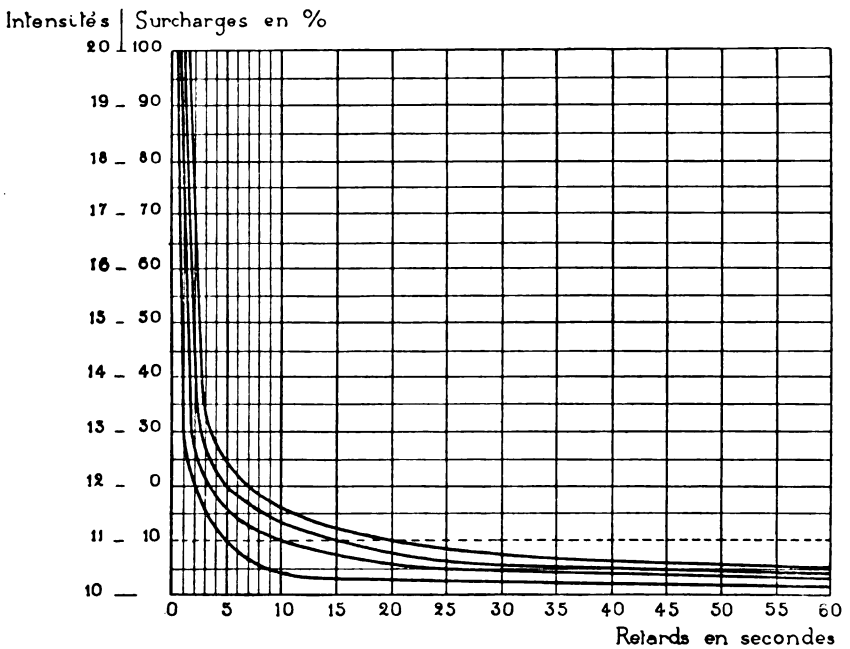


Fig. 3.

Construction des relais à temps variable. — Les relais à temps variable peuvent être divisés en trois classes bien distinctes: la première comprend les relais à disque, la deuxième ceux à solénoïde et la troisième, de moindre importance, quelques relais spéciaux n'appartenant ni à l'une ni à l'autre de ces catégories.

Tout le monde connaît les relais à disque utilisés d'une manière à peu près générale en Europe. Le prototype de ces appareils est le relais Ferranti: un disque en cuivre rouge à axe horizontal est placé dans un entrefer ménagé dans un circuit magnétique, portant un enroulement alimenté par le secondaire

Digitized by Google

d'un transformateur d'intensité. Un dispositif quelconque, un anneau de Frager, par exemple, permet d'obtenir dans ce circuit deux flux légèrement décalés l'un par rapport à l'autre; les courants induits par ces flux dans le disque, tendent à le faire tourner. Le couple ainsi obtenu est équilibré par un contrepoids suspendu à un fil enroulé sur l'axe du disque; en cas de surcharge le contrepoids est soulevé et vient au bout d'un temps plus ou moins long fermer le contact qui produit le déclanchement de l'interrupteur. Il existe un grand nombre d'appareils construits d'après ce principe, ils ne diffèrent entre eux que par certains détails: le choix du métal du disque: cuivre ou aluminium; la liaison entre le contrepoids et le disque: fil, secteur denté ou crémaillère; et enfin par la manière dont on fait varier le retard. Pour agir sur ce dernier élément certains constructeurs, les plus nombreux, agissent sur la course du contrepoids; d'autres déplacent un petit aimant permanent de manière à faire varier son action retardatrice. Pour régler l'intensité, certains constructeurs emploient encore le dispositif de Ferranti, qui consiste à modifier le contrepoids par des surcharges convenables; d'autres, au contraire, agissent sur le champ magnétique en faisant varier l'entrefer ou en le shuntant au moyen de pièces en fer mobiles.

Une disposition originale de cet appareil, récemment breveté par la Société Alsacienne à Belfort, consiste à remplacer le disque par une lame rectangulaire d'assez grande longueur placée verticalement dans l'entrefer du circuit magnétique: c'est le poids même de la pièce (sans doute équilibré en partie par un contrepoids) qui s'oppose à l'action des courants induits qui tendent à la soulever. Nous ne savons pas si cet appareil est construit d'une manière courante.

Les relais à disque fonctionnent généralement bien, certains constructeurs en ont même fait des appareils de haute précision: il y a peut-être là un écueil à éviter; mieux vaut faire un relais très robuste qu'un relais très précis. Nous avons vu, en effet, par les courbes données plus haut, que le retard n'a une valeur bien déterminée que pour une surcharge donnée; or, dans la réalité, la surcharge est quelconque, le retard est donc également quelconque; il importe alors assez peu que l'appareil soit d'une précision parfaite: ce qu'il faut c'est qu'il soit assez robuste pour supporter sans se détériorer les surcharges les plus considérables. Nous nous souvenons d'un appareil de ce genre,

Digitized by Google

dont la précision était remarquable, mais dont le disque se trouvait bloqué dès que la surcharge atteignait 100 %! Il ne faut pas perdre de vue que dans les centrales importantes les interrupteurs ne déclanchent guère qu'en cas de court-circuit sur le réseau, peu importe alors la précision dans le déclanchement, l'essentiel c'est qu'il se produise à coup sûr.

La deuxième catégorie de relais à retard variable comprend, comme nous l'avons dit plus haut, les relais à solénoïde, dans lesquels le mouvement du noyau est ralenti par un dash-pot. Ce genre d'appareil est particulièrement prisé en Amérique.

Les dash-pot peuvent être à huile, ou à air; dans ce dernier cas le cylindre et son piston sont généralement remplacés par un petit soufflet en cuir mince ou en caoutchouc. Tous ces relais, comme nous le disions plus haut, présentent une courbe des retards sensiblement analogue à celle des relais à disque; leur fonctionnement est peut-être un peu moins précis, mais ils sont incontestablement plus robustes et plus sûrs.

La troisième catégorie de relais à temps variable comprend, en particulier, ceux dans lesquels le retard est obtenu par l'échauffement d'un gaz, d'un liquide ou d'un fil conducteur. Les disjoncteurs Ferranti à fil chaud dont nous avons déjà parlé appartiennent à cette catégorie: il nous semble intéressant de reproduire le tableau des retards en fonction des surcharges, donné par cette Société:

Surcharges	Retards
25 %	5 minutes
50 %	20 secondes
100 %	7 „
200 %	8 „

On retrouve là encore la courbe caractéristique de tous les relais à temps variable.

La Société Siemens-Schuckert construit des relais à fil chaud utilisés pour les interrupteurs à haute tension: le fil chaud agit mécaniquement sur un cliquet qui dégage au bout d'un temps plus ou moins long l'armature destinée à provoquer le déclanchement.

Il existe un grand nombre de brevets pour des appareils plus ou moins ingénieux dans lesquels on utilise, par exemple, la dilatation de l'air dans une enceinte fermée, sous l'action d'une

Digitized by Google

bobine chauffée par le passage du courant, pour pousser une colonne de mercure destinée à fermer le contact de déclanchement.

Certains inventeurs ont imaginé encore de recourir à la variation de résistance d'un fil possédant un grand coefficient de température, le nickel, par exemple: la bobine de déclanchement est connectée aux bornes d'un shunt de ce métal et entre en action quand la différence de potentiel à ses bornes atteint une valeur suffisamment élevée.

Tous ces appareils sont intéressants en ce sens qu'ils agissent de la manière la plus logique possible, puisque le retard qu'ils donnent étant fonction de leur échauffement, est, en définitive, fonction de l'échauffement de l'ensemble du réseau.

En réalité, les relais précédemment décrits agissent exactement dans les mêmes conditions.

Emploi des relais à temps variable. — Nous avons dit plus haut qu'il fallait éviter l'emploi de ces relais dans les grandes stations centrales. Par contre, ce sont les appareils les mieux désignés pour assurer la protection efficace des moteurs tout en permettant des démarrages rapides et des surcharges momentanées; on doit aussi les utiliser dans les stations centrales peu importantes, qui ne comportent pas plusieurs disjoncteurs en série: ils rendent dans ce cas d'autant plus de services que ces centrales, en raison même de leur faible puissance, sont soumises, en service normal, à ces surcharges accidentelles relativement importantes.

Relais à temps constant. — Malgré l'intérêt que présentent ces relais il est très peu de constructeurs qui en fassent usage; parmi ceux-ci nous pourrions citer la Société Siemens-Schuckert (Relais N° 1428). Ce relais est constitué par un solénoïde dont le noyau entraîne au moyen d'une crémaillère un train d'engrenage dont le dernier mobile porte des ailettes. Le solénoïde est alimenté par une source à courant continu à tension constante, si bien qu'il fournit sa course en un temps bien déterminé, au bout duquel il établit le contact qui fait déclancher le disjoncteur. Le circuit du solénoïde est fermé lui-même par un relais à action instantanée d'un système quelconque, alimenté par un transformateur d'intensité.

La Compagnie des Compteurs, à Paris, construit un appareil analogue dans lequel le solénoïde est remplacé par un petit moteur à courant continu. C'est ce type de relais qui sera uti-

Digitized by Google

lisé dans la nouvelle usine que construit, à St-Ouen, la C^ie^ Parisienne de distribution d'électricité, usine qui renfermera 8 turbo-alternateurs de 10.000-15.000 kilowatts.

On pourrait évidemment utiliser de la même façon l'un quelconque des types de relais à temps variable, que nous avons précédemment décrits en ayant soin de l'alimenter sous une tension constante.

Les relais à temps constant peuvent être de construction plus précise et plus délicate que ceux à temps variable: avec ces appareils, en effet, d'une part, le souci de la précision n'est plus illusoire: un relais réglé à 3 secondes, par exemple, déclanchera toujours au bout de 3 secondes, quelle que soit la surcharge; d'autre part ils ne sont jamais soumis à des efforts exagérés, puisque le courant qui les traverse conserve une valeur constante.

Réglage du retard. – Le retard à choisir dépend, bien entendu, de l'application que l'on a en vue; par exemple, s'il s'agit d'un disjoncteur de moteur, le retard doit être proportionné au temps du démarrage et par conséquent à la puissance du moteur. Ceci ne présente aucune difficulté, car on peut faire des essais, et choisir, après quelques tâtonnements, le retard le plus convenable.

Lorsqu'il s'agit de régler des relais dans une station centrale l'incertitude est plus grande, car l'expérimentation est pour ainsi dire impossible.

D'une manière générale, on peut dire qu'il faut choisir le retard le plus faible possible, à condition toutefois qu'il n'en puisse résulter aucun dommage pour les machines ni pour les interrupteurs.

Lorsque la station est très importante et comporte des turbo-alternateurs de grande puissance, il ne faut pas, à notre avis, que ce retard soit jamais inférieur à 3 secondes.

On sait en effet, depuis quelques années, qu'au moment d'un court-circuit l'intensité peut atteindre une valeur considérable. Déjà M. Punga, dans l' " E. T. Z. „ du 6 septembre 1906, fixait, par le calcul, cette valeur à 21 fois le courant normal. L'année dernière M. Mile Walker de la " British Westinghouse Electric Co. „, faisant des essais sur un turbo-alternateur de 5.500 kilowatts à 4.000 volts, a pu, grâce à l'oscillographe à déroulement continu, mettre en évidence des surintensités atteignant en effet ce chiffre; dans la communication qu'il fit à se sujet à l' " Institution of Electrical Engineers „ (Manchester, 8 mars 1910), il

Digitized by Google

a émis l'opinion que cette valeur pouvait même, dans certains cas, être largement dépassée.

Dans cette même séance M. A. H. Law de la Société Parson a présenté des courbes très intéressantes, relevées également à l'oscillographe, sur un alternateur de 4.000 kilowatts 5.800 volts. Ces courbes confirment absolument les conclusions de M. Walcker; l'une d'elles, en particulier, donne une idée très nette du phénomène: après un court-circuit l'intensité atteint presque instantanément 6.500 ampères, soit 17 fois environ sa valeur normale; au bout d'une seconde cette intensité est encore de 1.500 ampères, et ce n'est qu'au bout de 3 secondes $^1/_2$ qu'elle redescend à sa valeur de régime (régime en court-circuit). Certains ingénieurs américains prétendent que l'intensité peut dépasser plus de 50 fois sa valeur normale. M. Cheyney, par exemple, dans une communication à l' " American Institute of Electrical Engineers „ admet que dans une centrale à turbines d'une puissance totale de 50.000 kilowatts 6.000 volts le courant instantané de court-circuit peut atteindre $\frac{50.000 \times 50}{3\,E} = 240.000$ ampères par phase; en supposant, dit-il, un facteur de puissance de 40 $^0/_0$ pendant le court-circuit, cette intensité correspond à une puissance de $50.000 \times 50 \times 0{,}40 = 1.000.000$ de kilowatts: c'est cette puissance énorme que doit couper un simple interrupteur de feeder prévu pour une intensité maxima de 300 ampères, lorsqu'un court-circuit se produit sur ce feeder, à faible distance de la station centrale. De nombreux accidents survenus aux interrupteurs à huile, dans les grandes centrales américaines, montrent qu'il ne s'agit pas là d'un phénomène exceptionnel, mais au contraire de faits qui peuvent se renouveler assez souvent dans un grand réseau de distribution. On comprend aisément que si l'on essaie de couper le courant au moment même du maximum, l'arc produit développe une quantité de chaleur suffisante pour vaporiser en partie l'huile de l'interrupteur, et provoquer des accidents dont le moins grave est la vidange complète du bac; l'explosion est souvent assez violente pour provoquer même son éclatement. Si la rupture au contraire est différée jusqu'à ce que le régime de court-circuit soit établi, l'arc est d'autant moins violent que la tension, qui est nulle au moment de la coupure, ne reprend sa valeur normale qu'après la rupture du circuit. Il ne semble pas que ce retard apporté au déclanchement doive aggraver notablement les effets du

Digitized by Google

court-circuit sur la machine ou sur les conducteurs. En effet, pour la machine, la conséquence la plus dangereuse du court-circuit, est de provoquer la dislocation des têtes de bobine par suite de l'action répulsive qui s'exerce entre les différentes parties des enroulements: en aucun cas un disjoncteur ne pourra agir assez rapidement pour éviter le choc qui se produit au moment du court-circuit; une fois ce choc passé, il n'y a plus grand inconvénient à laisser subsister le courant pendant 2 ou 3 secondes. Il serait intéressant que les constructeurs de machines nous donnent leur avis sur ce point.

Relais de blocage. — Il arrive très fréquemment que des postes de transformation de faible puissance sont alimentés par des centrales très importantes, comportant notamment des turbines de grande puissance: d'après ce que nous avons vu précédemment le type de disjoncteur à placer dans ces postes doit être déterminé par la puissance maxima qu'il aurait à couper en cas de court-circuit franc sur les barres à haute tension du poste. On se trouve ainsi conduit, si on veut que la sécurité soit complète, à placer dans tous les postes du réseau des interrupteurs de dimensions presque équivalentes à celles des disjoncteurs de la centrale.

Nous avons décrit l'année dernière (Bulletin de l'École Supérieure d'Électricité, Mai 1910) un système de relais qui permet, au contraire, d'utiliser des appareils de dimensions correspondantes à la puissance même du poste.

Ce relais, que nous avons appelé relais de blocage, consiste tout simplement en un tout petit disjoncteur placé en série avec le relais à action différée.

Le relais à action différée est réglé à la manière habituelle, pour déclancher, par exemple, pour une surcharge de 50 %; le relais de blocage, au contraire, est réglé pour l'intensité qui correspond à la puissance maxima que peut couper, sans être endommagé, l'interrupteur du poste.

Dans ces conditions, tous les accidents qui peuvent survenir du côté de la basse tension: surcharges, démarrages trop rapides, défauts d'isolement, etc., provoquent simplement le déclanchement de l'interrupteur du poste sans aucune répercussion sur le réseau; il en est de même en cas de court-circuit progressif sur l'enroulement à haute tension du transformateur. Au contraire, dans le cas d'un court-circuit franc sur la haute tension, le relais de blocage coupe le circuit du relais de déclan-

Digitized by Google

chement, avant que l'interrupteur n'ait déclanché, et maintient ce circuit ouvert jusqu'à ce que l'on soit venu le renfermer à la main. C'est dans ce cas l'interrupteur placé au début du feeder, soit à la centrale, soit dans un poste de coupure interposé entre la centrale et le poste de transformation, qui se trouve chargé de couper la portion du réseau où s'est produit l'accident.

Ces relais pourraient aussi trouver des applications intéressantes dans les stations centrales mêmes.

CHAPITRE IV.

Avenir de l'interrupteur à huile.

Les interrupteurs à l'huile sont-ils, à l'heure actuelle, parvenus à leur dernier état de perfection? A franchement parler, nous ne le croyons pas.

En effet, si les appareils actuels conviennent parfaitement aux centrales d'importance moyenne, ils deviennent insuffisants quand il s'agit de protéger des unités de 15.000 ou 20.000 Kw. qui seront probablement courantes dans les centrales futures.

Dans une note très intéressante présentée à l' " American Institute of Electrical Engineers „ (Jefferson M. H., 27-30 Janvier 1910) M. A. R. Cheyney a écrit la phrase suivante: " De violents court-circuits ont fréquemment démontré le fait qu'à l'heure actuelle, dans nos grandes stations centrales, il n'existe pas un interrupteur qui, après avoir coupé un court-circuit important, soit entièrement intact et prêt à être mis en service. Il faut toujours procéder à un examen des contacts, un nettoyage complet des pôles de l'interrupteur et des cellules qui le renferment, nettoyage nécessité par la grande quantité d'huile projetée au dehors par la pression explosive de l'arc; il faut aussi remplir à nouveau les cylindres; il est enfin souvent nécessaire de remettre un nouveau jeu de pièces de contact et de remplacer la tige isolante „.

Ces faits sont si connus en Amérique que l'Association des Compagnies d'Éclairage Edison a proposé de fixer à 40.000 Kw.

Digitized by Google

la puissance totale maxima des machines, qu'un interrupteur des types actuellement en usage est capable de protéger.

Peut-on moyennant certains perfectionnements reculer cette limite?

Pour nous, la réponse n'est pas douteuse: voici, croyons-nous, les points principaux qui doivent guider les constructeurs pour la construction des interrupteurs de grande puissance:

1° Coupure aussi rapide que possible;

2° Grand volume d'huile;

3° Emploi de l'huile sous pression.

Il est évident que plus l'extinction de l'arc est rapide, moins grande est la quantité d'huile vaporisée ou carbonisée.

Cette rapidité de coupure ne serait dangereuse qu'au cas où il serait démontré qu'elle peut causer des surtensions aux bornes de l'alternateur.

De nombreuses courbes relevées à l'oscillographe à déroulement continu n'ont jamais, à notre connaissance, révélé aucune surtension dans ce cas.

M. Boucherot, dans une communication fort intéressante faite à la Société Internationale des Électriciens (Paris, Juin 1911), démontre que, contrairement à l'opinion généralement reçue, " il n'y a certainement pas libération d'énergie dans le passage de la marche en court-circuit à la marche à vide; c'est dans le passage inverse qu'il y a libération d'énergie, laquelle donne lieu aux surintensités continues „, dont nous avons parlé plus haut.

Ce fait une fois admis, il est hors de doute que pour obtenir une coupure rapide, le meilleur système consiste à fractionner l'arc en un nombre de points aussi grand que possible: le nombre des coupures peut être par exemple de 6 à 8 par pôle; il est alors inutile de donner à l'armature mobile une course supérieure à 10 ou 12 centimètres, ce qui facilite beaucoup la construction de la partie mécanique et permet d'en loger tous les organes à l'intérieur du bâti.

Il est presque évident que la capacité de coupure de l'interrupteur est, toutes choses égales d'ailleurs, en raison directe de la quantité d'huile qu'il renferme: la carbonisation de l'huile est retardée, les contacts sont mieux refroidis et se brûlent moins

Digitized by Google

vite, enfin le volume d'huile déplacé par l'arc ou la poche de vapeur est petit, vis-à-vis de la quantité d'huile totale.

Les constructeurs américains ont pourtant remarqué que l'arc est atténué et se coupe plus facilement lorsqu'il se trouve renfermé dans une enceinte étroite: c'est ainsi que dans ses interrupteurs à tubes, la General Electric Co. dispose une série de cloisons isolantes horizontales, percées chacune d'une ouverture centrale étroite, qui sert de passage à la tige conductrice. Pour la même raison la Société Westinghouse garnit l'intérieur des bacs d'une couche de matière isolante assez épaisse, pour ne laisser subsister autour de l'armature mobile, qu'un espace d'huile aussi restreint que possible.

Si l'arc se coupe plus rapidement dans ces conditions, c'est, croyons-nous, parce que l'huile ne pouvant se déplacer facilement par suite de l'exiguité des passages qui lui sont réservés, se comprime et s'interpose alors d'autant plus rapidement entre les pièces où se produit la rupture, qu'elle est plus fortement comprimée.

La compression joue ici un double rôle: d'abord, comme nous venons de le dire, elle agit mécaniquement sur l'arc, de plus elle accroît considérablement la résistance diélectrique de l'huile et par suite réduit d'autant la distance à laquelle l'arc peut se maintenir, ou se rallumer.

On peut, croyons-nous, obtenir le même résultat dans des bacs de grandes dimensions, en comprimant l'huile soit à l'avance soit au moment du déclanchement.

On a proposé dans cette intention, et nous ne savons pas s'il existe des appareils ainsi conçus, de mettre la partie supérieure de l'interrupteur en relation avec une canalisation d'air comprimé: il est certain que ce système est excellent à condition de pouvoir obtenir des joints suffisamment étanches pour éviter les fuites d'air.

M. Cheyney, dans la communication que nous avons déjà mentionnée, propose un système dans lequel la bobine de déclanchement ouvrirait une valve qui laisserait pénétrer un flot d'huile sous pression, directement sur les pièces de conctact: on obtiendrait ainsi une sorte de soufflage analogue à celui de l'air comprimé dans les interrupteurs à air, mais bien plus énergique. Nous ne croyons pas que ce système ait été encore réalisé.

Un troisième dispositif plus simple que les précédents consiste à construire l'interrupteur de façon à ce qu'on puisse le

Digitized by Google

remplir entièrement d'huile, et à le munir d'une fermeture étanche. Au moment du déclanchement l'huile se trouve mise automatiquement sous pression par l'action de la vapeur d'huile qui tend à se former, et peut être de l'arc lui-même.

Il serait très intéressant pour le calcul de ces appareils de connaître la pression qui peut se développer dans de semblables conditions, au moment de la coupure d'un court-circuit: il est certain qu'elle est très élevée. Les premiers cylindres des interrupteurs de la General Electric Co. étaient construits en bois; il a fallu les remplacer par des cylindres en cuivre, puis en tôle d'acier, d'assez grande épaisseur: on a dû pour la même raison substituer des bacs en tôle aux anciens bacs en fonte.

A notre avis, les bacs devraient être en tôle d'acier de 4 à 5 millimètres d'épaisseur, et emboutis d'une seule pièce; si par raison d'économie les bacs sont en plusieurs parties il faut exécuter les joints à la soudure autogène.

Tout ce que nous venons de dire s'applique aussi bien aux interrupteurs à moyenne tension utilisés dans les stations centrales urbaines qu'à ceux à très haute tension destinés aux grands transports de force. La construction de ces deux types d'appareils peut néanmoins présenter d'assez notables différences.

Pour les premiers on est obligé, à cause de l'intensité du courant qui les traverse, d'utiliser des balais avec pare-étincelles massifs, se déplaçant verticalement.

Pour les deuxièmes il semble préférable de recourir à des dispositifs présentant moins d'inertie et par conséquent plus rapides d'actions. Jusqu'à présent néanmoins les principaux constructeurs américains utilisent, même pour les très hautes tensions, que l'on commence à rencontrer fréquemment de l'autre côté de l'océan, des interrupteurs qui ne diffèrent des types ordinaires que par la dimension des cuves et la longueur des coupures.

Dans les deux types les plus connus, ceux de la General Electric Co. et ceux de la Westinghouse Co., les bacs sont en tôle d'acier et reposent directement sur le sol, comme des cuves de transformateurs. Les couvercles en fonte supportent tout le mécanisme.

Pour obtenir des épaisseurs d'huile suffisantes les constructeurs ont été amenés à donner aux bacs des dimensions considérables.

L'interrupteur Westinghouse du type 110.000 volts contient environ 1.700 litres d'huile par pôle; la longueur totale de cou-

Digitized by Google

pure par pôle est de 1 m. 200. Grâce à ce grand volume d'huile la capacité de rupture de cet appareil est considérable: la Société Westinghouse le garantit capable de couper, sans être détérioré, n'importe quel court-circuit se produisant sur une installation de 120.000 kilowatts.

Les interrupteurs construits pour la même tension par la Société Brown-Boveri comportent 6 ruptures en série par pôle; la longueur totale de ces ruptures est d'environ 1 mètre, le volume d'huile de 1.000 litres.

La Société Industrielle des Téléphones a exposé dans le poste abaisseur de la ligne aérienne à 100.000 volts un interrupteur tripolaire du type 200 ampères 110.000 volts établi sur un principe assez différent des précédents.

Chacun des pôles de cet appareil comporte 2 couteaux horizontaux portés par des porcelaines verticales. Ces porcelaines sont fixées à la partie inférieure d'axes verticaux qui traversent le bâti en fonte de l'interrupteur. Dans la position de fermeture ces 2 couteaux sont dans le prolongement l'un de l'autre et établissent une liaison entre des mâchoires horizontales fixées à la base des porcelaines de sortie; au déclanchement les couteaux, sous l'action de ressorts puissants, pivotent de 90 degrés autour de ces axes et coupent ainsi le circuit.

Le nombre des ruptures en série est de 3, la longueur totale des ruptures est de 1 m. 200, la capacité en huile de 800 litres environ par pôle.

Ce dispositif présente semble-t-il les avantages suivants: une grande rapidité d'ouverture due à la faible inertie des pièces en mouvement; la réduction au minimum des remous, car l'huile se referme immédiatement après le passage des couteaux; enfin l'arc étant allongé horizontalement doit se couper plus facilement. Il serait intéressant de connaître les résultats que cet appareil donnera en service courant.

Indépendamment des procédés que nous venons de décrire il en existe certainement d'autres, encore ignorés ou peu connus, qui permettront d'étendre davantage les limites d'emploi des interrupteurs à huile.

Nous sommes persuadés que quelles que soient la puissance ou la tension que l'on envisage pour les centrales futures, on pourra toujours construire des interrupteurs à huile capables de remplir leur tâche sans défaillance.

Nous ne voudrions pas terminer cette étude, beaucoup trop

Digitized by Google

longue à notre avis, bien qu'encore très sommaire, sans adresser nos remerciements aux différents constructeurs qui ont bien voulu nous adresser des renseignements sur leurs appareils, et en particulier aux Sociétés Westinghouse, Ferranti, Brown-Boveri, General Electric, A. E. G., Siemens et Halske, Luigi Magrini, Sprecher et Schuh, dont les documents nous ont été des plus précieux.

Digitized by Google

Della marcia simultanea di parecchie Centrali alimentanti uno stesso gruppo di reti.

Rapporto sul tema N. 5 del Congresso.

Relatore Ing. GUIDO SEMENZA (Milano).

Coll'estendersi continuo delle utilizzazioni elettriche dell'energia idraulica, si fa sempre più frequente il caso che una stessa rete o uno stesso gruppo di reti siano alimentati da parecchie centrali generatrici d'energia. Originariamente questo caso era assai raro, perchè ciascuna centrale veniva ideata per servire una determinata città o una determinata plaga, ma, col diffondersi rapido e meraviglioso delle applicazioni elettriche, queste prime centrali divennero insufficienti e si dovette, per far fronte alla domanda d'energia, che continuamente aumentava, ricorrere sia al sussidio di centrali termiche, sia alla creazione di altri impianti idroelettrici, sia infine all'acquisto dell'energia proveniente da impianti appartenenti a terzi.

Quando dunque questo fatto si presenti, nasce evidentemente il problema del migliore modo di collegare fra di loro queste centrali e di ripartire fra i consumatori l'energia elettrica.

I metodi, sin qui seguiti, si può dire siano stati universalmente due:

1° La marcia in parallelo di tutte le generatrici sulle reti.

2° La suddivisione delle reti in altrettante zone quante sono le sorgenti d'energia, e quindi l'alimentazione indipendente di ciascuna di esse.

Digitized by Google

Per poter ben giudicare di queste due soluzioni è necessario aver presente allo spirito le caratteristiche e le esigenze di un servizio industriale di questo genere.

In una rete che comprenda una città o un gruppo di borgate, il carico è necessariamente variabile, sia secondo le ore del giorno, sia secondo le stagioni. Infatti è durante le ore della notte che si osserva un minimo di carico, mentre vi sono in generale due periodi di carico alto, ben definiti, durante 3 o 4 ore della mattinata e altrettante nel pomeriggio. Il riposo del mezzogiorno è segnato generalmente da un notevole abbassamento del diagramma. I giorni festivi si distinguono per un diagramma assai basso. Passando alle stagioni, l'estate è quella di minimo carico, l'inverno invece di massimo carico e, durante quest'ultimo, la sovrapposizione del servizio di forza motrice e di quello dell'illuminazione forma ciò che chiamasi punta o picco del diagramma.

La potenza delle generatrici in servizio deve essere variata, in modo da far fronte ad ogni istante al carico richiesto dalle reti. Ora, quando si abbiano a disposizione parecchie centrali, la maggior parte di esse sono a forza idraulica e qualcuna a forza termica; e il problema quotidiano di chi regge l'esercizio è quello di utilizzare al massimo grado le sorgenti idrauliche, riducendo il lavoro fatto da quelle termiche al minimo possibile. Soltanto a questo modo si ottiene lo sfruttamento completo delle forze idrauliche. È evidente come la marcia in parallelo di tutte le centrali sia la soluzione che teoricamente meglio risponda a questo problema.

Infatti, con la marcia in parallelo è facilissimo smistare il carico delle reti da un'officina all'altra, senza che ne derivino disturbi agli utenti: basta per questo una leggerissima alterazione nella pressione delle molle dei regolatori. Perciò non presenta alcuna difficoltà il mantenere durante le ore di carico elevato tutti gli impianti a forza idraulica al loro massimo carico, producendo soltanto ciò che è strettamente necessario cogli impianti a vapore. La grandezza poi del sistema che si ottiene, attutisce e rende insensibile l'effetto di quella continua variazione di carico dovuto all'avviamento ed all'arresto dei motori e specialmente alla tormentata richiesta di servizi a trazione.

Ma se teoricamente il sistema risponde a tutte le esigenze, coloro i quali hanno pratica di grossi impianti elettrici, sanno benissimo che, al sopravvenire di un disturbo di esercizio, le cose

Digitized by Google

non si svolgono con tutta la semplicità che sarebbe desiderabile. Infatti quando per una ragione qualunque una delle sorgenti di energia viene ad uscire di servizio, e ciò può accadere per un grandissimo numero di cause, tutto il carico viene a ricadere sulle altre centrali, le quali non sempre sono in grado di resistere a questa aumentata richiesta e spesso avviene che una dopo l'altra si eliminino dal servizio. Inoltre, se lo staccarsi di una parte di un impianto avviene per effetto di un corto circuito o di un disturbo grave, che richiami violentemente dell'energia in un certo punto dell'impianto, il contraccolpo che risente l'intero sistema può essere tale da far scattare gli interruttori automatici in diverse parti di esso, in modo da interrompere anche quelle sorgenti che non hanno provocato l'incidente. Per modo che troppo frequentemente avviene che una causa, anche piccola, possa generare una paralisi in tutto il sistema.

Ma qui non sono finiti i guai, perchè la ripresa del servizio, in tali condizioni, diventa lunga e laboriosa. È necessario sezionare le reti, mettere in parallelo le stazioni, le quali, essendo a distanza fra di loro, non sempre riescono a comunicare perfettamente col telefono, mezzo sempre delicato e incerto, per modo che spesso le interruzioni si prolungano più di quanto sia consentibile in un esercizio regolare.

La seconda soluzione accennata mette certamente riparo ad alcuni di questi inconvenienti, giacchè se ciascuna generatrice lavora con un rete separata, i danni che avvengono in qualunque parte sia della centrale, che della rete, non possono ripercuotersi che su una sola zona del sistema.

Ma evidentemente il seguire con le varie centrali le variazioni del diagramma di carico, curando specialmente l'economia generale dell'impianto, diventa molto laborioso e richiede una frequente messa in parallelo di due o più degli impianti. Infatti quando, per esempio, il carico dall'essere tale che possa sostenersi con tutti gli impianti idraulici, aumenta al punto che sia necessario introdurre una riserva a vapore, è necessario spostare alcune parti della rete da uno all'altro degli impianti idraulici, allo scopo di lasciare libera una zona abbastanza grande, per assorbire l'energia prodotta dalla centrale a vapore. A parte che questi passaggi non possono essere fatti che molto grossolanamente, per cui la massima economia del servizio non è certo completamente raggiunta, è da notare che ogni manovra di

Digitized by Google

messa in parallelo rappresenta una perturbazione del sistema, e può in alcuni casi essere, quando male eseguita, la causa di un serio disservizio.

Il sistema quindi non può considerarsi che un ripiego e non vi è forse che un caso solo in cui sia da ritenersi praticamente soddisfacente. Questo caso è quello nel quale si tratta di sorgenti tutte termiche e ciascuna provvista di una riserva abbastanza larga, per far fronte a qualsiasi evenienza: ma è evidente che questa non si può considerare come soluzione del problema, ma può anzi chiamarsi il non risolverlo affatto.

Non sarà privo d'interesse, poi, il sentire se gli interruttori automatici, i quali potrebbero essere indicati per rendere più facile la soluzione del sistema, abbiano nella pratica dato quei risultati che se ne potrebbe aspettare, specialmente nel senso di aprirsi quando loro spetta, e di non aprirsi quando non vi è ragione che si aprano. Perchè tutti sappiamo che almeno fino a poco tempo fa gli interruttori automatici non rispondevano troppo bene ai requisiti che si richiedevano loro.

Come si vede, dunque, il problema è assai complesso e difficile e certamente, in sede di discussione, sarà molto interessante di sentire da coloro, i quali hanno in esercizio sistemi di questo genere, quale delle soluzioni abbiano adottato, e di quale importanza intrinseca sieno praticamente gli inconvenienti che sono venuto enumerando. Sarà anche interessante sentire se vi sia qualcuno che abbia adottato il secondo sistema, facendo i passaggi in parallelo, quando sia necessario di trasportare una rete da una centrale all'altra, e se un sistema simile abbia nella pratica dato buoni risultati.

E giacchè ho dovuto assumermi di presentare l'argomento al Congresso, quasi iniziando la discussione, esporrò un sistema intermedio, si può dire, fra i due accennati, che si va in questi tempi gradualmente applicando negli impianti della Società Edison di Milano, e che ritengo dovrebbe dare una soluzione abbastanza pratica del problema. Si tratta cioè di ottenere la marcia in parallelo di tutti gli impianti e di tutte le reti, sino a che il funzionamento di tutte le parti sia regolare, e di ottenere invece la suddivisione del sistema in altrettante centrali alimentanti una sola rete, quando avvenga un disturbo, capace in un sistema normale, di trascinare con sè l'intero servizio. Con questo si ottiene di limitare il disservizio ad una parte dell'impianto. Ciò può essere ottenuto in modo abbastanza semplice.

Digitized by Google

Consideriamo anzitutto due impianti indipendenti fra di loro e ciascuna delle due centrali alimentante la propria rete. Suppongo ora di collegare un punto qualunque delle linee che rilegano ciascuna centrale alla rete per mezzo di un interruttore automatico speciale, che chiamerò *K*.

Le caratteristiche di questo interruttore sono di essere a scatto immediato, senza alcun differimento nel tempo, e, per ragioni che vedremo più avanti, di avere l'apparecchio determinante lo scatto o *relais* wattmetrico. Con questa prima disposizione otterremo i seguenti vantaggi.

Le due centrali sono in parallelo, formano quindi un sistema più grande: se una delle centrali dispone di una certa potenza di sovraccarico, questa potrà essere fino a certo limite utilizzata sulle due reti. Ma quando avvenga un disservizio su una delle due reti l'interruttore *K* si aprirà istantaneamente, lasciando i due sistemi separati fra di loro e solo l'impianto in cui è avvenuto il guasto sarà disturbato. Facciamo ora un passo più avanti. Supponiamo che le due reti si trovino vicine fra di loro e cioè formino, per esempio, la rete di distribuzione di una grande città. Allora posso supporre che vi sia un punto nel quale convengano le linee provenienti dalle due centrali, e dal quale si dipartano gli alimentatori delle reti, come è rappresentato nella fig. 1. Si disponga in questo punto di due sistemi di sbarre collettrici *A* e *B* e ad *A* si rileghi la linea proveniente dalla centrale 1 e a *B* quella proveniente dalla centrale 2.

Ora faremo un'ulteriore supposizione, che la rete anzichè potersi dividere in due, possa dividersi in un certo numero di zone, che chiameremo *a*, *b*, *c*, e che ciascuna di queste zone possa essere a volontà collegata o colle sbarre *A* o colle sbarre *B*.

È una disposizione questa abbastanza comune nelle grandi officine, dove si desidera avere un sistema di sbarre di riserva.

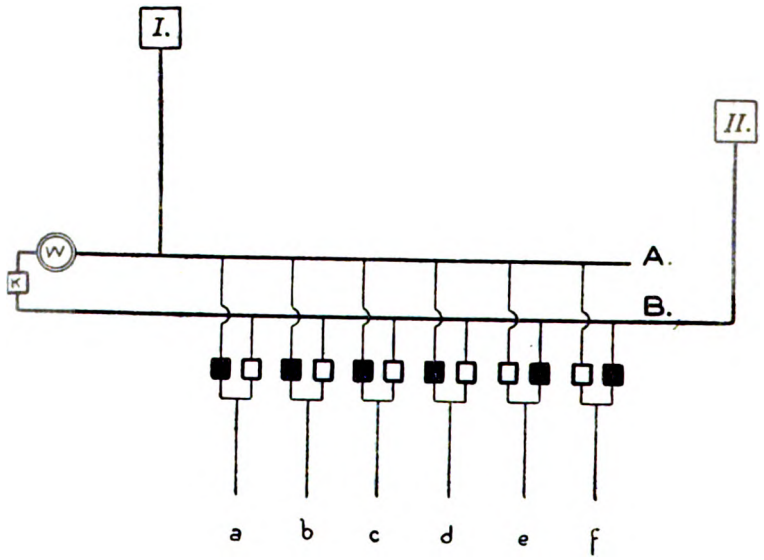
Ora per ultima cosa fra le sbarre *A* e *B* si disponga un interruttore automatico *K*, come antecedentemente descritto.

Per fissare le idee con qualche cifra, suppongo che ciascuna zona assorba 1000 Kw. ed, essendo quelle rappresentate sul disegno in numero di sei, avremo bisogno, per alimentarle, di 6000 Kw. Se la centrale 1 può dare 4000 Kw. e la centrale 2 rispettivamente 2000 Kw., è chiaro che si potranno allacciare 4 zone, per esempio *a*, *b*, *c*, *d*, alle sbarre *A* e 2 zone *e*, *f* alle sbarre *B*, come è infatti dimostrato nel disegno.

Stando così le cose, ed essendo l'interruttore automatico *K*

Digitized by Google

chiuso, tutto marcia in parallelo e non vi è nessuna differenza con un sistema normale in parallelo, del quale questo ha tutti i vantaggi. Si noti che in questa condizione nessuna quantità di energia passa pel collegamento *K*. Avvenga però un guasto alla linea dell'impianto 2, per modo che cessi l'erogazione di tale impianto e che la linea richiami una forte corrente di corto circuito. Immediatamente l'interruttore *K* sarà attraversato da una grande quantità di energia e si aprirà: allora avremo il sistema diviso nettamente in due impianti separati, quello facente capo alla centrale 1, che continuerà imperturbato il suo servizio, e quello relativo alla centrale 2 che sarà fermo.



Si otterrà dunque, come primo risultato, di limitare l'arresto di servizio ad una sola parte del sistema, mentre se esso fosse stato semplicemente in parallelo, molto probabilmente il macchinario della stazione 1 non sarebbe stato capace di sopportare l'intero carico di 6000 Kw. oltre a quello del corto circuito e tutto si sarebbe arrestato.

Viene allora la ripresa di servizio. Se la centrale 2 si mette subito in condizioni di ridare l'energia, che è il caso più fre-

Digitized by Google

quente, non vi è nulla da fare, giacchè l'energia, arrivando, alimenta le zone *e*, *f* che sono separate dalle altre. Con tutta comodità poi si farà il parallelo con l'interruttore *K*. Se invece la centrale 2 ha un guasto serio, si potrà provvedere a riattivare la zona *e* o la zona *f* o ambedue, a seconda della potenza che la stazione 1 potrà mettere a disposizione in quel momento, e ciò sarà tanto più facile se l'impianto 1 sarà a vapore.

Si vede come, perchè il sistema funzioni soddisfacentemente, sia necessario che il carico delle zone sia suddiviso fra le sbarre *A* e *B* esattamente in proporzione alla potenzialità relativa dei due impianti, e ciò ad ogni istante. È questo assai facile ad ottenersi.

Infatti vogliamo supporre che l'impianto 1 sia idraulico e l'impianto 2 a vapore. Per alcune ore del giorno l'impianto 2 dovrà rimanere fermo, perchè il carico complessivo delle zone non supererà i 4000 Kw.; allora tutte le zone dovranno trovarsi collegate colla sbarra *A*.

Aumenti ora il carico, per esempio, di 1000 Kw. Allora sarà necessario attaccare in servizio la centrale a vapore. Se lasciassimo tutte le cose allo stesso posto, tutta la corrente prodotta da questa centrale dovrebbe, per andare ad alimentare le reti, passare per l'interruttore *K* e potrebbe farlo scattare.

Questo deve l'elettricista di servizio evitare, col semplice trasportare una delle zone, per esempio la zona *f*, sulla sbarra *B*, ciò che si fa con tutta semplicità essendo a disposizione due interruttori. Si vede subito come l'apparecchio *K* debba essere sussidiato da un wattmetro, che indichi l'energia che travasa da una sbarra all'altra, wattmetro che deve anche, per maggior sicurezza, dare delle indicazioni ottiche od acustiche, appena che l'energia, che travasa da un sistema di sbarre all'altro, assuma un valore troppo elevato. Ed anzi nella pratica si usa un unico apparecchio per compiere queste funzioni e per chiudere la corrente ausiliare di scatto dell'automatico *K*.

Nell'esercizio dunque si tratta semplicemente di trasportare da una sbarra all'altra delle zone, in modo che l'energia che attraversa il sistema dell'interruttore *K* e del relativo wattmetro, sia sempre mantenuta al disotto di un certo valore limite determinato. Questa operazione è nell'esercizio della massima semplicità e viene facilitata dai richiami automatici, dati dal wattmetro.

È chiaro che la cosa potrebbe farsi anche con un semplice

Digitized by Google

dispositivo ampermetrico; ma allora potrebbero nascere delle inutili interruzioni, quando si stabiliscano delle intense correnti di egualizzazione fra le varie generatrici.

Questo modo di risolvere il problema non si limita soltanto al caso di due generatrici e di una rete unica, ma può sempre essere applicato ad un numero qualsiasi di elementi, quando naturalmente questi abbiano dei centri di distribuzione, nei quali possa essere fatto lo smistamento delle zone.

Nel caso della Società Edison, a cui accennavo, le sorgenti di energia sono cinque, e le zone di utilizzazione trovansi in parte a Milano e in parte lungo le linee e il sistema si applica in modo perfetto. Non solo, ma si può anche, e questo viene fatto nel caso delle reti della Società Edison, suddividere in questo modo anche una delle centrali in varie parti, specialmente se questa centrale è di una potenza molto grande rispetto alle altre, in modo da ottenere degli aggruppamenti aventi potenze pressochè eguali. Seguendo questi criteri l'intero sistema della Società Edison è divisibile in 8 aggruppamenti, per modo che, quando avvenga un disservizio in qualche sua parte, soltanto circa 1/8 dell'intera potenza viene messa temporaneamente fuori servizio, lasciando tutto il resto indisturbato.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Dans ce rapport on considère les installations où plusieurs sources d'énergie électrique alimentent un même réseau de distribution. Après avoir mis en évidence les caractères et les exigences d'un tel système, l'Auteur discute les deux solutions généralement adoptées, c'est-à-dire, la marche en parallèle de toutes les centrales, ou la subdivision des réseaux en autant de parties indépendantes qu'il y a de centrales pour les alimenter.

La marche en parallèle qui est la meilleure solution, théorique, présente nombre d'inconvénients dans la pratique.

Comme contribution à la discussion, l'Auteur décrit une disposition qui va être adoptée par la Société Edison de Milan et qui devrait réduire sensiblement les inconvénients de la marche en parallèle.

DISCUSSION

Mr. P. TORCHIO (New York) *déclare qu'il a suivi avec beaucoup d'intérêt l'exposition de l'Auteur: il rappelle qu'un système analogue a été appliqué dans les usines de New York, et conclut de ce fait à l'opportunité d'une disposition du genre exposé par Mr. Semenza.*

Mr. G. SEMENZA (Milan) *admet qu'il y a quelque analogie entre les deux procédés sans qu'ils soient tout à fait identiques.*

Mr. H. DUBS (Rome). *Je me permettrai seulement d'indiquer que la disposition de Mr. Semenza est appliquée depuis 2 ans environ à Marseille, usine de St.-Giniez, pour la distribution du courant au réseau des Tramways, alimenté à la fois par un transport d'énergie à 50.000 volts et par une usine à vapeur.*

L'usine à vapeur est parfois appelée à fournir principalement le courant dévatté de l'installation, ce qui améliore le facteur de puissance du réseau de transmission; d'autre part, le nombre des machines à

Digitized by Google

vapeur à mettre en marche est variable suivant l'importance de l'immobilisation des usines hydro-électriques: on doit donc régler le relais Wattmétrique qui commande le disjoncteur à déclanchement instantané placé entre les deux jeux de barres.

Cette installation a toujours fonctionné d'une façon absolument satisfaisante.

Mr. U. Del Buono (Rome) *remarque que la méthode de Mr. Semenza peut s'appliquer aussi à des centrales disposées sur une ligne (par exemple sur un même cours d'eau) et non pas seulement à des centrales disposées suivant des rayons autour du centre d'utilisation. Il faut pour cela relier chaque centrale au dit centre par une ligne spéciale, ce qui se fait très souvent pour pouvoir concentrer les manœuvres de mise en parallèle dans un seul endroit.*

Mr. W. Wyssling (Zurich) *remercie Mr. Semenza d'avoir présenté à la Section ce système de jonction de plusieurs usines fonctionnant en parallèle. On peut se demander si le système décrit, très pratique pour la distribution dans une ville, peut également servir dans le cas où l'énergie doit être distribuée à une certaine quantité de petits centres de consommation, réunis par une ligne ou un réseau principal partant de plusieurs centrales primaires.*

C'est le cas de la majeure partie des grandes installations de la Suisse, où l'on utilise les forces hydrauliques à grande distance. Généralement ces usines hydro-électriques ne sont reliées que par leurs lignes à haute tension (25.000-50.000 volts).

Aux points de jonction de ces lignes, partant, par exemple, de deux usines primaires nommées A et B, se trouve généralement une sous-station S où la tension est réduite à une valeur moins élevée (5000-10.000 volts), qu'on appelle tension intermédiaire. De ces sous-stations partent donc ordinairement les réseaux de distribution avec cette tension intermédiaire. Même dans une installation de ce genre on pourrait en effet adopter l'interrupteur K du système Semenza: on devra intercaler cet interrupteur dans la sous-station S, de façon à pouvoir répartir à droite ou à gauche de l'interrupteur K les transformateurs réducteurs à la tension intermédiaire de la sous-station, et les lignes partant éventuellement en haute tension, suivant les puissances respectives des stations A et B.

Mais le cas est fréquent où plusieurs sous-stations S_1, S_2, etc. se trouvent entre les centrales A et B sur la même ligne de jonction en haute tension.

Le point de partage de l'énergie provenant des deux centrales sera toujours une sous-station S, dans laquelle devrait se trouver l'interrupteur K, mais

Digitized by Google

pour utiliser complètement l'énergie hydraulique cette station S devra pouvoir changer de jour en jour et même d'une heure à l'autre de S_1 à S_2, etc. Si, par exemple, la centrale A dispose d'une petite chute, d'une puissance constante, tandis-que la centrale B utilise une chute élevée munie d'un grand réservoir accumulateur, la station S comportant l'interrupteur K devra être transportée dans une sous-station rapprochée de la centrale A, pendant les heures du maximum de la puissance consommée (heures de lumière, hiver) et dans une sous-station rapprochée de l'usine B pendant les heures de basse consommation.

Pour appliquer le Schéma de distribution Semenza à des installations offrant de telles conditions de fonctionnement, on pourrait installer des interrupteurs K_1, K_2, etc. dans chacune des sous-stations S_1, S_2, etc. et régler les relais des interrupteurs K de telle sorte que le déclanchement se fasse toujours et uniquement dans celle des sous-stations qui, au moment considéré, représenterait le point de division désirable entre les deux sources d'énergie A et B.

Mr. SEMENZA *répond que ce que vient d'exposer Mr. Wyssling est parfaitement pratique. En effet, dans la première forme qu'il a imaginée du Schéma, au lieu d'utiliser les deux jeux de barres collectrices, il n'en employait qu'un, qu'il partageait en autant de sections munies chacune d'un interrupteur K qu'il fallait de lignes de sortie. Ce Schéma primitif, appliqué au cas de plusieurs sous-stations distribuées le long d'une ligne, correspond précisément aux desiderata exprimés par Mr. Wyssling.*

Digitized by Google

Association en parallèle des installations à courant alternatif

Marche en parallèle à distance.

G. Dumoulin (Anzin - Nord-France)
Ingénieur aux Mines d'Anzin.

On ne se contente plus aujourd'hui d'accoupler sur les barres omnibus d'un tableau de distribution les alternateurs d'une même usine.

Les développements énormes pris par les distributions d'énergie ont créé également la nécessité d'associer en parallèle des usines, ou — pour parler d'une manière plus générale — des installations à courant alternatif, parfois très éloignées les unes des autres.

Lorsque la résistance et la réactance des lignes de liaison sont peu importantes, eu égard à la tension de distribution, la marche en parallèle à distance n'offre pas plus de difficultés que le couplage des alternateurs d'une station centrale.

Mais si l'on augmente l'impédance des lignes, on observe bientôt — pour certaines conditions de charge des réseaux locaux des installations accouplées, ou pour certaines valeurs des puissances fournies par les alternateurs, — des oscillations plus ou moins accentuées, des décrochages, parfois même en l'absence de toute perturbation pulsatoire d'ordre mécanique.

A partir d'une certaine valeur de l'impédance, le fonctionnement en parallèle devient impossible pour tous les régimes de marche.

Digitized by Google

Il est pratiquement très intéressant de connaître les relations essentielles, dont dépend la stabilité du fonctionnement en parallèle des *installations*, qui existent entre les divers éléments de celles-ci et ceux de leur ligne de liaison, abstraction faite d'ailleurs des effets de résonnance mécanique.

Ce sont ces relations que nous nous sommes proposés d'établir.

Tous les cas rencontrés en pratique peuvent être ramenés à celui de la marche en parallèle de deux installations.

Nous supposerons, dans la première partie de cette étude, que l'une des deux installations est infiniment grande par rapport à l'autre.

Cette hypothèse apporte certaines simplifications; elle correspond d'ailleurs aux conditions pratiques de la marche en parallèle de deux installations d'importances très différentes.

Nous comprenons sous le terme " Installation „ un ensemble de génératrices et de récepteurs placés ou ramenés dans un voisinage relatif.

I. **Association en parallèle de 2 installations dont l'une est infiniment grande par rapport à l'autre.**

Considérons les installations A et B, et supposons que l'installation A soit infiniment grande par rapport à l'installation B.

Soient:

a) Pour l'installation A:

U la tension efficace de distribution, considérée comme indépendante des échanges de courant entre A et B, par suite de la très grande importance relative de A.

b) Pour l'installation B:

V la tension efficace, voisine de U, mais variable avec la puissance fournie.

I_B l'intensité efficace du courant total fourni par les génératrices de B, que nous supposerons remplacées par une seule de puissance convenable.

ωl l'impédance, réduite à la réactance de cette génératrice.

E la force électromotrice efficace.

α l'angle de décalage entre E et V.

φ_B „ „ „ V et I_B.

Digitized by Google

$\frac{V}{a}$ l'intensité efficace du courant watté fourni aux récepteurs du réseau propre de B.

$\frac{V}{b}$ l'intensité efficace du courant dévatté fourni à ces mêmes récepteurs.

c) Pour la ligne de liaison:

I l'intensité efficace du courant circulant dans la ligne.

ϱ la résistence ohmique.

$\omega\lambda$ la réactance.

$K\varrho = \sqrt{\varrho^2 + \omega\lambda^2}$

$\operatorname{tg}\psi = \frac{\omega\lambda}{\varrho}$

β l'angle de décalage entre V et la direction directement opposée à U.

φ le décalage entre V et I.

Les données ci-dessus doivent naturellement être rapportées à une seule phase si les installations considérées sont à courant polyphasé.

Les figures (1) et (2) nous donnent:

$$\begin{cases} \frac{E\sin\alpha}{\omega l} = \frac{V}{a} + I\cos\varphi \\ \frac{E\cos\alpha - V}{\omega l} = \frac{V}{b} + I\sin\varphi \end{cases}$$

$$\begin{cases} I\cos\varphi = \frac{V}{K\varrho}\cos\psi - \frac{U}{K\varrho}\cos(\beta+\psi) \\ I\sin\varphi = \frac{V\sin\psi}{K\varrho} - \frac{U}{K\varrho}\sin(\beta+\psi) \end{cases}$$

d'où:

$$\begin{cases} \frac{E\sin\alpha}{\omega l} = \frac{V}{a} + \frac{V}{K\varrho}\cos\psi - \frac{U}{K\varrho}\cos(\beta+\psi) \\ \frac{E\cos\alpha - V}{\omega l} = \frac{V}{b} + \frac{V\sin\psi}{K\varrho} - \frac{U}{K\varrho}\sin(\beta+\psi) \end{cases}$$

que l'on peut écrire:

$$\begin{cases} \frac{E\sin\alpha}{\omega l} = \frac{V}{r} - \frac{U}{K\varrho}\cos(\beta+\psi) & (1) \\ \frac{E\cos\alpha}{\omega l} = \frac{V}{s} - \frac{U}{K\varrho}\sin(\beta+\psi) & (2) \end{cases}$$

Digitized by Google

en posant:

$$\begin{cases} \dfrac{1}{r} = \dfrac{\cos\psi}{K\varrho} + \dfrac{1}{a} \\ \dfrac{1}{s} = \dfrac{1}{\omega l} + \dfrac{\sin\psi}{K\varrho} + \dfrac{1}{b} \end{cases}$$

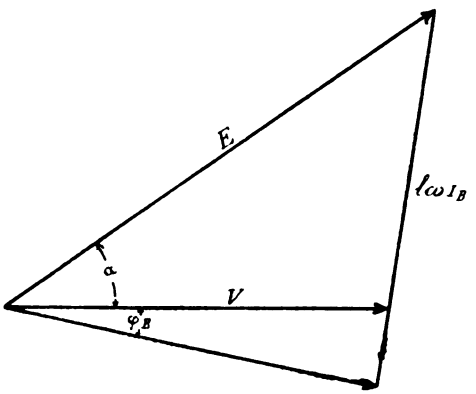


Fig. 1.

Remarquons que $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{s} - \frac{1}{\omega l}$ sont respectivement la *conductance* * et la *susceptance* *, par rapport à l'alternateur de B, de l'ensemble constitué par le réseau propre de B et la ligne

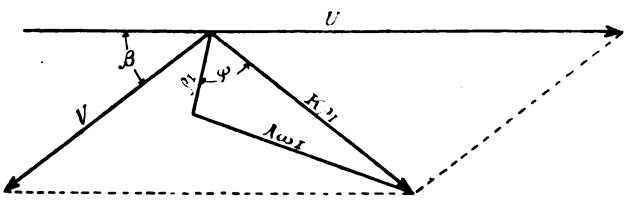


Fig. 2.

(*) Nous rappelons que pour un circuit de résistance R et d'inductance $L\omega$ on a:

$$\text{Conductance} = \frac{R}{R^2 + L^2\omega^2} = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$$

$$\text{Susceptance} = \frac{L\omega}{R^2 + L^2\omega^2} = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$$

Digitized by Google

de liaison mise en court-circuit à son extremité opposée, ou, si l'on veut, de l'ensemble des 2 installations B et A, l'impédance de cette dernière étant négligeable par hypothèse.

On a d'ailleurs, en appelant W la puissance totale fournie par l'alternateur de B:

$$V = \frac{V E \sin \alpha}{\omega l} = \frac{V^2}{r} - \frac{V U}{K \varrho} \cos (\beta + \psi) . \qquad (3)$$

Les équations précédentes permettent ainsi de déterminer V, I_B, I, β etc. en fonction de la puissance motrice de B et de la force électromotrice (c'est-à-dire l'excitation) de son alternateur.

Supposons que, pour une cause quelconque, l'alternateur B soit légèrement écarté de sa position d'équilibre. Les angles α et β varient respectivement des quantités $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, et le déplacement angulaire des parties tournantes de l'alternateur par rapport à la position d'équilibre est $\Delta\vartheta = \Delta\alpha + \Delta\beta$.

Ce déplacement $\Delta\vartheta$ entraîne une variation de charge correspondante ΔW.

Le degré de stabilité de la marche en parallèle peut évidemment se définir par le rapport $\frac{\Delta W}{\Delta\vartheta}$ ou mieux par $\frac{dW}{d\vartheta}$ qui mesure ce que l'on pourrait appeler la *stabilisation.*

Déterminons $\frac{dW}{d\vartheta}$.

Multiplions les 2 membres des équations (1) et (2) respectivement par $\frac{1}{r} \frac{E \sin \alpha}{\omega l}$ et $\frac{1}{r} \frac{E \cos \alpha}{\omega l}$.

Ajoutons ensuite membre à membre:

$$\frac{1}{r^2} \frac{EV \sin \alpha}{\omega l} + \frac{1}{rs} \frac{EV \cos \alpha}{\omega l} - \frac{1}{r} \frac{E}{\omega l} \frac{U}{K \varrho} \sin (\alpha + \beta + \psi) = \frac{1}{r} \frac{E^2}{\omega^2 l^2} . \qquad (4)$$

Nous obtenons aussi par soustraction, après avoir multiplié (1) par $\frac{1}{s} \frac{E \cos \alpha}{\omega l}$ et (2) par $\frac{1}{s} \frac{E \sin \alpha}{\omega l}$:

$$\frac{1}{rs} \frac{EV \cos \alpha}{\omega l} - \frac{1}{s^2} \frac{EV \sin \alpha}{\omega l} - \frac{1}{s} \frac{E}{\omega l} \frac{U}{K \varrho} \cos (\alpha + \beta + \psi) = 0. \qquad (5)$$

Digitized by Google

Retranchons (5) de (4)

$$\frac{E V \sin\alpha}{\omega l}\left(\frac{1}{r^2}+\frac{1}{s^2}\right)+\frac{E}{\omega l}\frac{U}{K\varrho}\left[\frac{\cos(\alpha+\beta+\psi)}{s}-\frac{\sin(\alpha+\beta+\psi)}{r}\right]=\frac{E^2}{\omega^2 l^2}\frac{1}{r}$$

que l'on peut écrire

$$\frac{E V \sin\alpha}{\omega l}+\frac{E}{\omega l}\frac{U}{K\varrho}\frac{r s}{\sqrt{r^2+s^2}}\left(\frac{r}{\sqrt{r^2+s^2}}\cos(\alpha+\beta+\psi)-\right.$$

$$\left.-\frac{s}{\sqrt{r^2+s^2}}\sin(\alpha+\beta+\psi)\right)=\frac{E^2}{\omega^2 l^2}\frac{r s^2}{r^2+s^2}.$$

Posons:

$$\frac{r s}{\sqrt{r^2+s^2}}=z \qquad \frac{s}{\sqrt{r^2+s^2}}=\sin\eta \qquad \frac{r}{\sqrt{r^2+s^2}}=\cos\eta$$

$$v=\frac{E}{\omega l}z \quad p=\frac{E^2}{\omega^2 l^2}\frac{r s^2}{r^2+s^2}=\frac{E}{\omega l}v\sin\eta \quad q=\frac{E^2}{\omega^2 l^2}\frac{r^2 s}{r^2+s^2}=\frac{E}{\omega l}v\cos\eta$$

$$\zeta=\psi+\eta-\frac{\pi}{2} \qquad \chi=\vartheta+\zeta.$$

Nous tirons alors de (6):

$$\frac{E V \sin\alpha}{\omega l}=W=p+\frac{E}{\omega l}\frac{z}{K\varrho}U\sin\left(\alpha+\beta+\psi+\eta-\frac{\pi}{2}\right)$$

$$W=p+\frac{E}{\omega l}\frac{z}{K\varrho}U\sin(\vartheta+\zeta)$$

$$W=p+\frac{E}{\omega l}\frac{z}{K\varrho}U\sin\chi \qquad (7)$$

$$=p+\frac{v U}{K\varrho}\sin\chi$$

$$=p+w\sin\chi \qquad w=\frac{v U}{K\varrho}.$$

Une suite analogue de calculs nous donnerait de même:

$$\frac{E V \cos\alpha}{\omega l}=q+\frac{E}{\omega l}\frac{z}{K\varrho}U\cos\chi \qquad (8)$$

$$=q+\frac{v U}{K\varrho}\cos\chi$$

$$=q+w\cos\chi.$$

Digitized by Google

Il est facile de reconnaître que η, v, p et q sont les valeurs respectives de α, V, $\frac{E V \sin \alpha}{\omega l}$ et $\frac{E V \cos \alpha}{\omega l}$ correspondant à la marche isolée de l'alternatenr B sur l'ensemble des circuits ayant, d'après une remarque précédente, $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{s} - \frac{1}{\omega l}$ comme conductance et susceptance.

La stabilisation $S = \frac{d W}{d \vartheta}$, que nous cherchons, s'obtient immédiatement en différentiant l'équation (7):

$$S = \frac{d W}{d \vartheta} = \frac{E}{\omega l} \frac{z}{K \varrho} U \cos \chi \quad = w \cos \chi \tag{9}$$

ou d'après (8):

$$S = \frac{E V \cos \alpha}{\omega l} - q = \frac{E V \cos \alpha}{\omega l} - \frac{E V \cos \eta}{\omega l}. \tag{10}$$

Nous n'entrerons pas ici dans les détails de la discussion générale de ces équations. Nous nous proposons d'y revenir spécialement dans une autre étude.

Nous nous contenterons seulement d'indiquer la représentation graphique ci-contre (fig. 3), qui constitue le *diagramme de fonctionnement*, à excitation constante et pour une certaine puissance absorbée par le réseau local de B.

Son intérêt pratique est évident.

Signalons cependant les valeurs limites vers lesquelles tendent certains termes lorsque l'impédance de la ligne de liaison devient négligeable.

$$\frac{z}{K \varrho} = 1 \qquad \eta = \frac{\pi}{2} - \psi \qquad v = 0$$

$$p = 0$$

$$q = 0$$

$$S = \frac{E V \cos \alpha}{\omega l}.$$

On retrouve alors les formules ordinaires de la marche en parallèle.

Ainsi la formule (9) ou la construction graphique de la fig. (3) nous permettent de calculer, pour une installation donnée, la stabilisation $\frac{dW}{d\vartheta}$ correspondant à chaque régime de marche.

Digitized by Google

Il est donc possible de déterminer expérimentalement pour des groupes électrogènes, d'un certain type de construction, des valeurs minima positives, au-dessous desquelles, eu égard aux perturbations d'ordre mécanique, la stabilisation ne peut descendre sans inconvénient, lorsque ces groupes fonctionnent en parallèle avec un réseau infini — c'est-à-dire pratiquement avec un réseau d'une très grande importance relative.

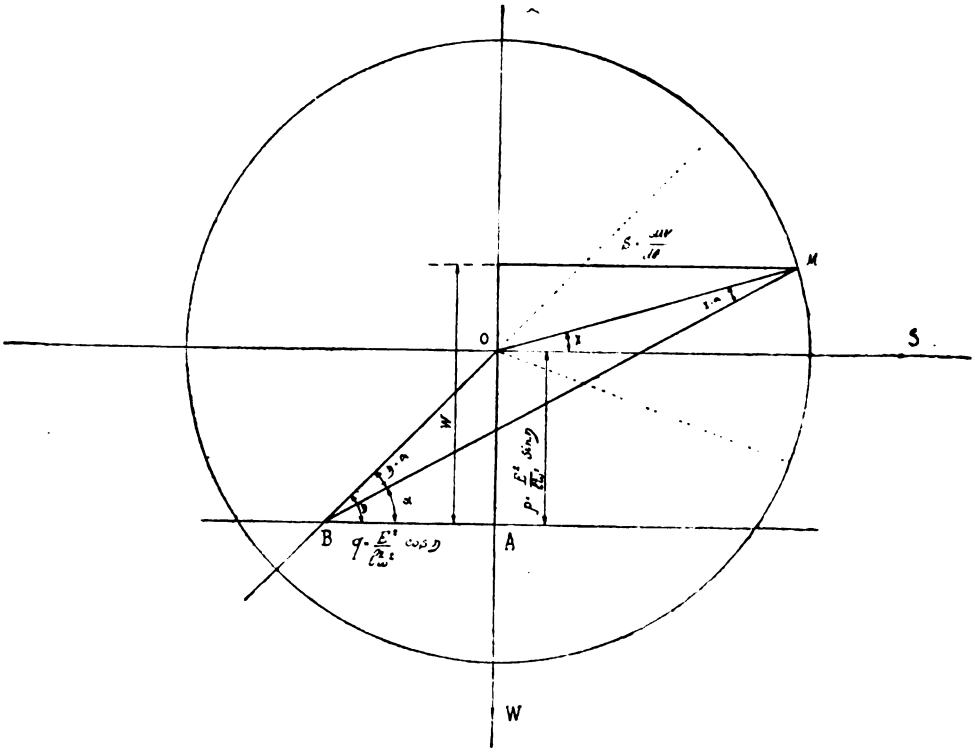


Fig. 3.

Il est alors facile de se rendre compte, *a priori*, de la possibilité d'accoupler, avec un tel réseau, par l'intermédiaire d'une ligne dont les constantes sont connues, une installation comportant des groupes similaires.

Un autre élément, dont on ne se préoccupe ordinairement pas, joue, ainsi que nous l'avons nettement constaté, un rôle très important dans la marche en parallèle à distance.

Nous voulons parler de la variation de flux que peut entraîner la variation de l'angle de décalage ϑ.

Abstraction faite des fuites et de la perte ohmique dans l'in-

Digitized by Google

duit, nous mesurerons sensiblement cette variation de flux par le rapport

$$\sigma = \frac{\frac{d\,V}{d\,\vartheta}}{V}.$$

Ce rapport est constamment nul lorsque l'impédance de la ligne reliant l'alternateur au réseau infini est négligeable.

Il n'en est plus de même quand cette impédance prend une certaine valeur: V varie alors avec ϑ, comme le montre la fig. 3.

Il en résulte que, lorsqu'un régime oscillatoire s'établit, le flux tend à subir des fluctuations, plus ou moins importantes, en relation avec l'écart angulaire.

En réalité ces fluctuations sont très attenuées, grâce à l'inertie électromagnétique de l'inducteur, dont tous les circuits fermés sont le siège de courants induits qui s'opposent à la variation du flux.

Ceci nous conduit à admettre que la force électromotrice E — représentant les ampères-tours inducteurs — que nous avons jusqu'à présent supposée constante, varie pendant l'oscillation: sa variation étant en sens inverse de celle que tend à présenter V.

Nous voyons ainsi apparaître dans l'expression $\frac{dW}{d\vartheta}$ un terme "*transient*„ en $\frac{dE}{d\vartheta}$ qui est négatif, et diminue par suite la stabilisation, lorsque $\frac{dV}{d\vartheta}$ est positif.

Comme d'autre part la différence de phase, — rapportée au mouvement oscillatoire —, entre ΔE et ΔV n'est pas exactement de 180°, il s'introduit de ce fait, dans l'expression de l'amortissement *, un terme qui est soustractif dans l'hypothèse $\frac{dV}{d\vartheta} > o$.

Ce terme peut ainsi, s'il atteint une valeur suffisante, rendre l'amortissement négatif, et provoquer un balancement progressif amenant le décrochage.

Pour améliorer les conditions de la marche en parallèle, il faudra donc chercher à reduire le plus possible les variations

---

* ou plus exactement dans le terme en $\frac{d}{dt}\Delta\vartheta$ de l'équation du mouvement oscillatoire.

Digitized by Google

de flux, de même signe que ϑ, qui tendent à se produire, c'est-à-dire à diminuer le rapport $\sigma = \frac{\frac{dV}{d\vartheta}}{V}$, considéré, indépendamment de tout " *transient* „, en supposant E constant.

Un raisonnement analogue montre qu'au contraire les valeurs négatives de σ correspondent à une augmentation des effets d'amortissement.

Le rapport σ se déduit aisément des équations (7) et (8).

Ces équations nous donnent d'abord:

$$V \sin \alpha = z \frac{E}{\omega l} \sin \eta + \frac{z}{K \varrho} U \sin \chi$$

$$V \cos \alpha = z \frac{E}{\omega l} \cos \eta + \frac{z}{K \varrho} U \cos \chi$$

d'où nous tirons:

$$V = z \frac{E}{\omega l} \cos (\eta - \alpha) + \frac{z}{K \varrho} U \cos (\alpha - \chi)$$

$$\frac{dV}{d\vartheta} = U \frac{z}{K \varrho} \sin (\alpha - \chi)$$

et par suite:

$$\sigma = \frac{\sin (\alpha - \chi)}{\frac{K \varrho E}{U \omega l} \cos (\eta - \alpha) + \cos (\alpha - \chi)}.$$

Comme d'ailleurs (fig. 3)

$$\frac{E^2}{\omega^2 l^2} z \sin (\eta - \alpha) = \frac{E}{\omega l} \frac{z}{K \varrho} U \sin (\alpha - \chi)$$

c'est-à-dire

$$\frac{E K \varrho}{U \omega l} = \frac{\sin (\alpha - \chi)}{\sin (\eta - \alpha)}.$$

On a donc:

$$\sigma = \frac{1}{\operatorname{ctg} (\eta - \alpha) + \operatorname{ctg} (\alpha - \chi)} = \frac{\operatorname{tg} (\eta - \alpha) \operatorname{tg} (\alpha - \chi)}{\operatorname{tg} (\eta - \alpha) + \operatorname{tg} (\alpha - \chi)}. \quad (11)$$

Le diagramme de la fig. 3 nous montre ainsi que σ s'annule pour $W = W_2$. Le fonctionnement en parallèle sera par

Digitized by Google

suite plus satisfaisant à cette charge qu'à la charge W_1 par exemple.

Remarquons d'ailleurs que le σ correspondant à une charge quelconque dépend essentiellement de l'excitation.

En effet si on modifie E, le rayon OM varie et le point A se déplace sur l'axe des W.

De même que pour la stabilisation, il sera facile d'établir expérimentalement, pour un type d'alternateur determiné, la valeur positive σ_M qu'il conviendra de ne jamais dépasser.

Cette limite sera d'autant plus réduite que le coefficient normal d'amortissement sera plus faible.

Elle sera aussi évidemment plus petite pour les génératrices, à faible coefficient de fuite et à grande réaction d'induit, comme le sont les turbo-alternateurs, que pour les alternateurs ordinaires.

II. **Association en parallèle de deux installations quelconques.**

Soient A et B les deux installations en question.

Reprenons les mêmes notations que pour B, dans le cas précédent, en affectant de l'indice 1 celles relatives à A et de l'indice 2 celles relatives à B.

Nous pouvons établir, en ce qui concerne A, les équations:

$$\begin{cases} \dfrac{E_1 \sin \alpha_1}{\omega l_1} = \dfrac{V_1}{r_1} - \dfrac{V_2}{K\varrho} \cos(\beta - \psi) & (12) \\ \dfrac{E_1 \cos \alpha_1}{\omega l_1} = \dfrac{V_1}{s_1} + \dfrac{V_2}{K\varrho} \sin(\beta - \psi). & (13) \end{cases}$$

Et en ce qui concerne B:

$$\begin{cases} \dfrac{E_2 \sin \alpha_2}{\omega l_2} = \dfrac{V_2}{r_2} - \dfrac{V_1}{K\varrho} \cos(\beta + \psi) & (14) \\ \dfrac{E_2 \cos \alpha_2}{\omega l_2} = \dfrac{V_2}{s_2} - \dfrac{V_1}{K\varrho} \sin(\beta + \psi). & (15) \end{cases}$$

Partant de ces équations, nous arrivons par une suite de calculs analogues à ceux développés dans notre 1re hypothèse aux expressions ci-dessous:

Digitized by Google

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{E_1 V_1 \sin \alpha_1}{\omega l_1} = \dfrac{E_1}{\omega l_1} v'_1 \sin \eta_1' + \dfrac{v'_1 v_2}{K\varrho} \sin\left(\alpha_1 - \alpha_2 - \beta + \eta'_1 + \eta_2 + \psi - \dfrac{\pi}{2}\right) & (16) \\ \dfrac{E_1 V_1 \cos \alpha_1}{\omega l_1} = \dfrac{E_1}{\omega l_1} v'_1 \cos \eta'_1 + \dfrac{v'_1 v_2}{K\varrho} \cos\left(\alpha_1 - \alpha_2 - \beta + \eta'_1 + \eta_2 + \psi - \dfrac{\pi}{2}\right) & (17) \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_2 = \dfrac{E_2 V_2 \sin \alpha_2}{\omega l_2} = \dfrac{E_2}{\omega l_2} v'_2 \sin \eta'_2 + \dfrac{v'_2 v_1}{K\varrho} \sin\left(\beta + \alpha_2 - \alpha_1 + \eta_2' + \eta_1 + \psi - \dfrac{\pi}{2}\right) & (18) \\ \dfrac{E_2 V_2 \cos \alpha_2}{\omega l_2} = \dfrac{E_2}{\omega l_2} v'_2 \cos \eta'_2 + \dfrac{v'_2 v_1}{K\varrho} \cos\left(\beta + \alpha_2 - \alpha_1 + \eta'_2 + \eta_1 + \psi - \dfrac{\pi}{2}\right). & (19) \end{cases}$$

Ces expressions tiennent compte des relations suivantes :

$$v_1 = \frac{E_1}{\omega l_1} z_1 \qquad z_1 = \frac{r_1 s_1}{\sqrt{r_1^2 + s_1^2}} \qquad v_2 = \frac{E_2}{\omega l_2} z_2 \qquad z_2 = \frac{r_2 s_2}{\sqrt{r_2^2 + s_2^2}}$$

$$\sin \eta_1 = \frac{s_1}{\sqrt{r_1^2 + s_1^2}} \qquad \cos \eta_1 = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + s_1^2}} \qquad \sin \eta_2 = \frac{s_2}{\sqrt{r_2^2 + s_2^2}} \qquad \cos \eta_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + s_2^2}}$$

$$v'_1 = \frac{E_1}{\omega l_1} z'_1 \qquad z'_1 = \frac{r'_1 s'_1}{\sqrt{r'^2_1 + s'^2_1}} \qquad v'_2 = \frac{E_2}{\omega l_2} z'_2 \qquad z'_2 = \frac{r'_2 s'_2}{\sqrt{r'^2_2 + s'^2_2}}$$

$$\sin \eta'_1 = \frac{s'_1}{\sqrt{r'^2_1 + s'^2_1}} \qquad \cos \eta'_1 = \frac{r'_1}{\sqrt{r'^2_1 + s'^2_1}} \qquad \sin \eta'_2 = \frac{s'_2}{\sqrt{r'^2_2 + s'^2_2}} \qquad \cos \eta'_2 = \frac{r'_2}{\sqrt{r'^2_2 + s'^2_2}}$$

$$\frac{1}{r'_1} = \frac{1}{r_1} - \frac{z_2}{K^2 \varrho^2} \sin(2\psi + \eta_2) \qquad \frac{1}{r'_2} = \frac{1}{r_2} - \frac{z_1}{K^2 \varrho^2} \sin(2\psi + \eta_1)$$

$$\frac{1}{s'_1} = \frac{1}{s_1} + \frac{z_2}{K^2 \varrho^2} \cos(2\psi + \eta_2) \qquad \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{s_2} + \frac{z_1}{K^2 \varrho^2} \cos(2\psi + \eta_1).$$

Il est facile de vérifier que l'on a identiquement

$$\eta_1' + \eta_2 = \eta_2' + \eta_1 \qquad z_1' z_2 = z_2' z_1 \qquad v_1' v_2 = v_2' v_1.$$

Si nous remarquons d'autre part que $\beta + \alpha_2 - \alpha_1$ est l'angle de décalage ϑ entre les forces électromotrices E_1 et E_2 qui représentent les 2 usines, les équations (16) (17) (18) et (19) pourront s'écrire :

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{E_1 V_1 \sin \alpha_1}{\omega l_1} = p_1 + w \sin(\zeta - \vartheta) = p_1 + w \sin \chi_1 = p_1 - w \sin \chi' & (20) \\ = \dfrac{E_1 V_1 \cos \alpha}{\omega l_1} = q_1 + w \cos(\zeta - \vartheta) = q_1 + w \cos \chi_1 = q_1 + w \cos \chi_1 & (21) \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_2 = \dfrac{E_2 V_2 \sin \alpha_2}{\omega l_2} = p_2 + w \sin(\zeta + \vartheta) = p_2 + w \sin \chi_2 & (22) \\ = \dfrac{E_2 V_2 \cos \alpha_2}{\omega l_2} = q_2 + w \cos(\zeta + \vartheta) = q_2 + w \cos \chi_2. & (23) \end{cases}$$

Digitized by Google

En posant:

$$p_1 = \frac{E_1 v'_1}{\omega l_1} \sin \eta'_1 \qquad p_2 = \frac{E_2 v'_2}{\omega l_2} \sin \eta'_2$$

$$q_1 = \frac{E_1 v'_1}{\omega l_1} \cos \eta'_1 \qquad q_2 = \frac{E_2 v'_2}{\omega l_2} \cos \eta'_2$$

$$w = \frac{v'_1 v_2}{K\varrho} = \frac{v'_2 v_1}{K\varrho}$$

$$\zeta = \eta'_1 + \eta_2 + \psi - \frac{\pi}{2} = \eta'_2 + \eta_1 + \psi - \frac{\pi}{2}$$

$$\chi_1 = \zeta - \vartheta$$

$$\chi'_1 = -\chi_1 = \vartheta - \zeta$$

$$\chi_2 = \zeta + \vartheta.$$

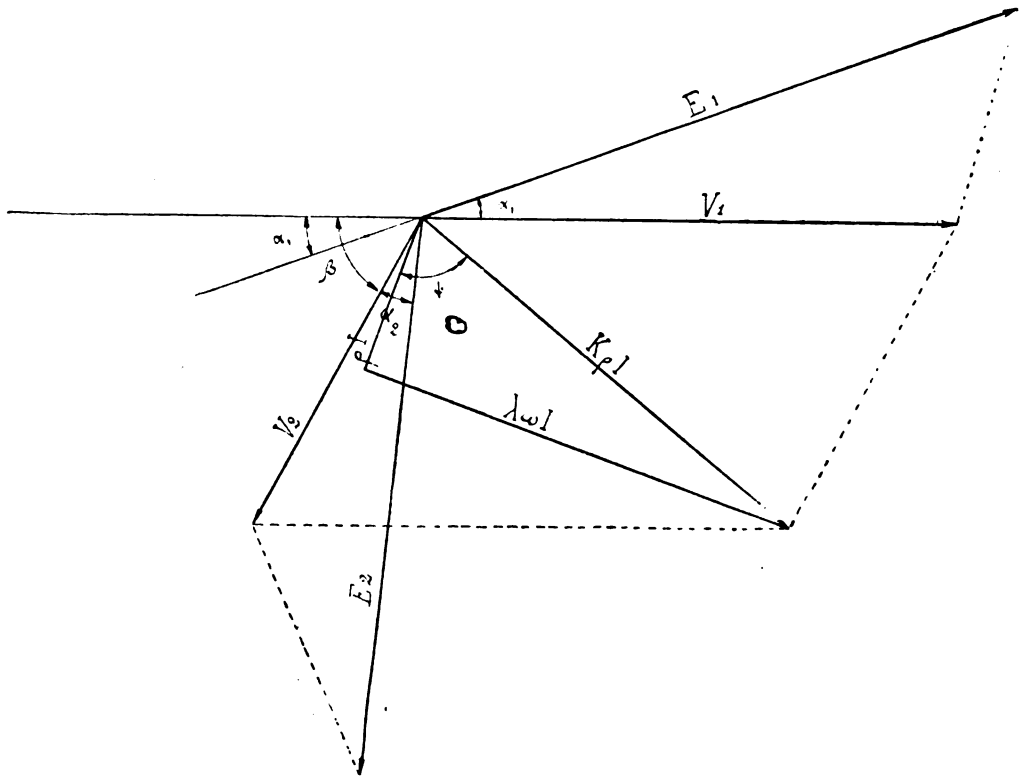


Fig. 4.

Nous retrouvons ainsi des expressions semblables à celles du cas examiné en premier lieu, de la marche en parallèle d'une installation quelconque avec un réseau infini.

Digitized by Google

Les stabilisations et les rapports σ nous seront donc fournis par des formules analogues aux formules (9) et (11), en considérant pour E_1 l'angle $\vartheta' = -\vartheta$ compté à partir de E_2, ϑ étant compté à partir de E_1:

$$S_1 = w \cos \chi_1 \qquad S_2 = w \cos \chi_2$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\operatorname{ctg}(\eta'_1 - \alpha_1) + \operatorname{ctg}(\alpha_1 - \chi_1)} = \frac{\operatorname{tg}(\eta'_1 - \alpha_1)\operatorname{tg}(\alpha_1 - \chi_1)}{\operatorname{tg}(\eta'_1 - \alpha_1) + \operatorname{tg}(\alpha_1 - \chi_1)}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{\operatorname{ctg}(\eta'_2 - \alpha_2) + \operatorname{ctg}(\alpha_2 - \chi_2)} = \frac{\operatorname{tg}(\eta'_2 - \alpha_2)\operatorname{tg}(\alpha_2 - \chi_2)}{\operatorname{tg}(\eta'_2 - \alpha_2) + \operatorname{tg}(\alpha_2 - \chi_2)}.$$

Le diagramme de la fig. 5, dans lequel l'axe des W_1 fait un angle de $\pi + 2\zeta$ avec l'axe de W_2, procure un moyen particulièrement commode d'étudier les variations de S_1, S_2, σ_1 et σ_2 * avec tous les éléments du problème.

A ce point de vue nous croyons utile d'indiquer la signification physique de certains des termes rencontrés.

$\frac{1}{r_1}$ et $\frac{1}{s_1} - \frac{1}{\omega l_1}$ sont respectivement la conductance et la susceptance, par rapport à l'alternateur de A, du groupe de circuits constitué par le réseau propre de A et la ligne de liaison mise en court-circuit à son extrémité opposée.

η_1 et v_1 sont les valeurs prises par α_1 et V_1, si on suppose que l'alternateur de A alimente isolément ce groupe de circuits.

$\frac{1}{r'_1}$ et $\frac{1}{s'_1} - \frac{1}{\omega l_1}$ représentent la conductance et la susceptance, par rapport à l'alternateur A, de *l'ensemble de tous les circuits*, y compris celui de l'alternateur B, qui intervient par son impédance ωl_2.

$\eta'_1, v'_1, p'_1, q'_1$ sont les valeurs que prennent respectivement α_1, $V_1 \frac{E_1 V_1 \sin \alpha_1}{\omega l_1}$, $\frac{E_1 V_1 \cos \alpha_1}{\omega l_1}$ lorsqu'on se place dans l'hypothèse où l'alternateur A alimente l'ensemble des circuits.

Les termes semblables, affectés de l'indice 2, ont évidemment par rapport à B des significations identiques.

---

* Le diagramme fournit également les différentes valeurs de $V_1, V_2, \alpha_1, \alpha_2, \varrho I^2$, etc. On a, par ex.:

$$V_1 = B_1 M \times \frac{\omega l_2}{E_1}$$

$$V_1 = B_2 M \times \frac{\omega l_2}{E_2}.$$

Digitized by Google

Lorsque l'impédance $K\varrho$ de la ligne de liaison tend vers 0, notons que $\frac{z_1}{K\varrho} = \frac{z_2}{K\varrho} = 1$, et que $\eta_1 = \eta_2 = \frac{\pi}{2} - \psi$.

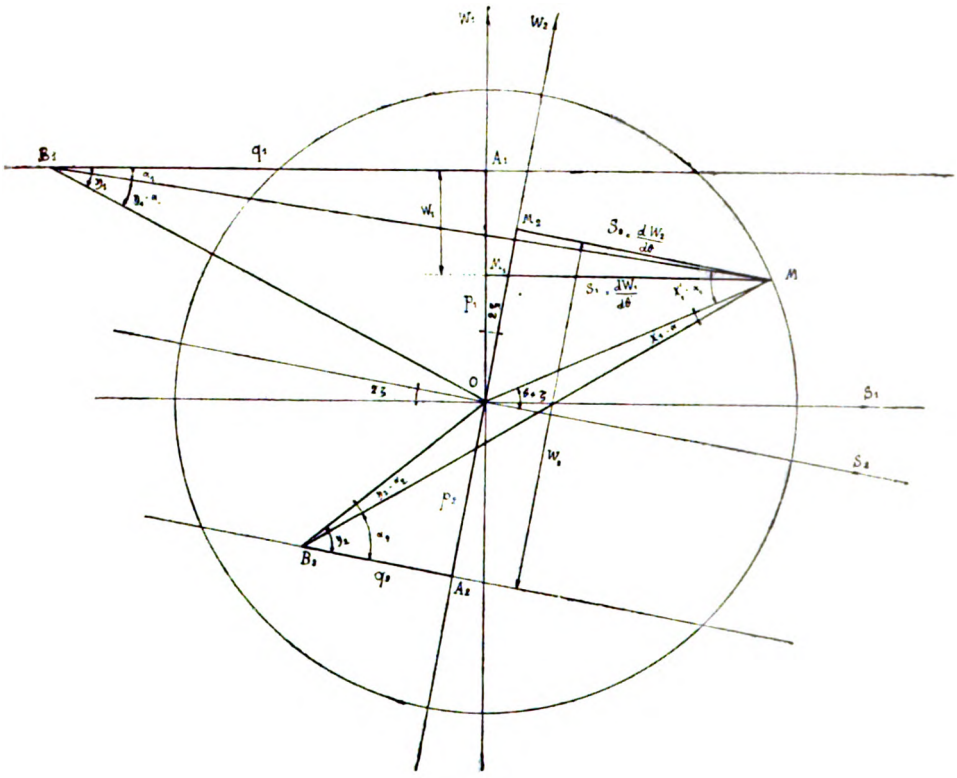


Fig. 5.

III. **Application**.

Nous avons appliqué le résultats de cette étude à deux installations existantes, dont le fonctionnement en parallèle présentait des anomalies inexpliquées.

Les éléments de ces deux installations étaient les suivants:

INSTALLATION A. — Turbo-alternateur triphasé de 1000 Kws à 25 périodes sous 5250^{v}.

Réseau local absorbant 400 Kws, à la tension normale, avec $\cos \varphi = 0{,}8$.

Amortissement important — noyau inducteur constitué par des

Digitized by Google

disques pleins, et comportant des cannelures fermées par des cales en laiton, reliées à deux flasques extrêmes en bronze.

Par phase:

Tension normale: $\frac{5250}{\sqrt{3}} = 3000$ Volts.

Puissance normale de l'alternateur: $\frac{1000}{3} = 333$ Kws.

Impédance moyenne de l'alternateur: $\omega l_1 = 14$.

Puissance absorbée par le réseau local: $\frac{400}{3} = 133$ Kws.

INSTALLATION B. — Turbo-alternateur triphasé de 600 Kws à 25 périodes sous 5250^v.

Réseau local absorbant 400 Kws, à la tension normale, avec $\cos \varphi$ 0,8.

Amortissement très réduit — noyau inducteur en tôles feuilletées, avec cannelures fermées par des cales en bois dur.

Par phase:

Tension normale: $\frac{5250}{\sqrt{3}} = 3000$ Volts.

Puissance normale de l'alternateur: $\frac{600}{3} = 200$ Kws.

Impédance moyenne de l'alternateur: $\omega l_2 = 28$.

Puissance absorbée par le réseau local: $\frac{400}{3} = 133$ Kws.

LIGNE DE LIAISON. — Câble armé à 3 conducteurs:

Résistance de chaque conducteur $\rho = 8$ ohms.
Inductance négligeable $\omega\lambda = 0$.

Nous supposerons d'abord le réglage des excitations effectué de manière à ce que chaque alternateur fournisse le courant dévatté nécessaire aux récepteurs de son réseau local.

Nous avons sensiblement dans ces conditions:

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= 3500^v \\ E_2 &= 4000^v \end{aligned}\right\} \text{ par phase.}$$

Digitized by Google

Nous pouvons alors établir les équations (20) (21) (22) et (23) de la marche en parallèle. Nous obtenons:

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{E_1 V_1 \sin \alpha_1}{\omega l_1} = 180{\cdot}000 - 255\,000 \sin (\vartheta - \zeta) \\ \dfrac{E_1 V_1 \cos \alpha_1}{\omega l_1} = 500{\cdot}000 + 255\,000 \cos (\vartheta - \zeta) \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_2 = \dfrac{E_2 V_2 \sin \alpha_2}{\omega l_2} = 96{\cdot}000 + 255\,000 \sin (\vartheta + \zeta) \\ \dfrac{E_2 V_2 \cos \alpha_2}{\omega l_2} = 160{\cdot}000 + 255\,000 \cos (\vartheta + \zeta) \end{cases}$$

avec $\zeta = 2°$.

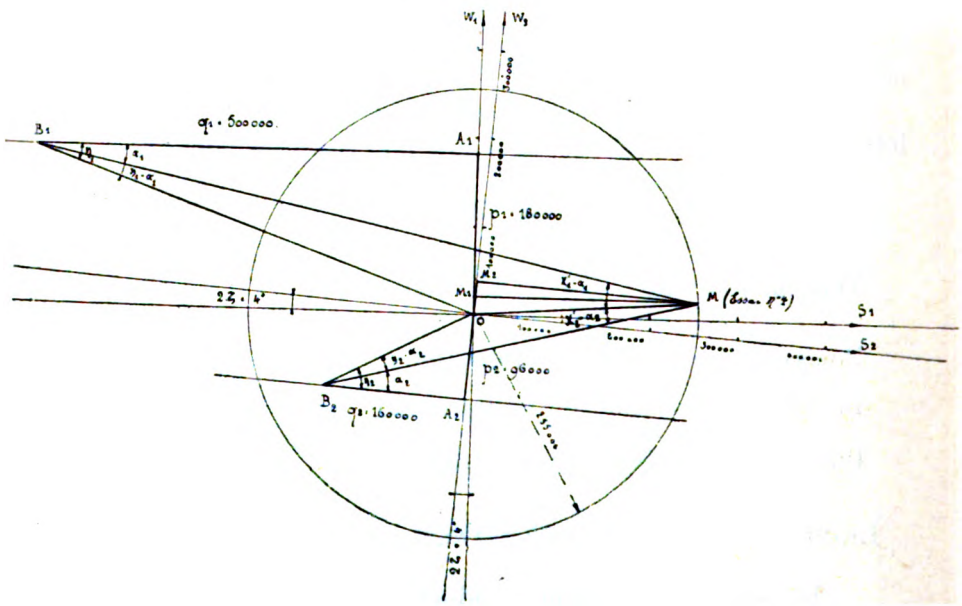


Fig. 6.

Ces équations nous permettent de construire le *diagramme de fonctionnement* (fig. 6), qui nous donne en particulier les valeurs S_1, S_2, σ_1, σ_2, à différentes charges.

Dans le tableau ci-dessous nous avons placé, en regard des valeurs calculés des stabilisations et des rapports σ, les conditions de marche observées au cours de nos essais:

$$E_1 = 3500^V \qquad E_2 = 4000^V.$$

Digitized by Google

N. des Essais	Kws par phase		Volts par phase		Kws par phase				Conditions de la marche en parallèle
	W_1	W_2	V_1	V_2	S_1	S_2	σ_1	σ_2	
1	306	0	3125	2800	230	240	— 0,016	0,22	Marche en parallèle impossible — le décrochage se produit rapidement après quelques oscillations d'amplitude croissantes.
2	236	50	3125	2900	248	251	0,03	0,17	
3	188	100	3100	2950	250	252	0,071	0,11	
4	152	133	3050	3000	255	250	0,105	0,081	Marche peu stable — décrochages fréquents.
5	100	166	3000	3025	246	240	0,135	0,042	Marche en parallèle parfaite.
6	86	200	2950	3050	250	252	0,167	négligeable	Marche en parallèle très stable avec quelques oscillations de faible amplitude.

Aussi, nous voyons que la marche en parallèle devient impossible dès que σ_2 dépasse 0,1 environ ; ce qui correspond à une charge de 100 à 133 Kws (300 à 400 Kws) pour l'alternateur B.

Par contre σ_1 peut atteindre 0,16 sans qu'il y ait décrochage.

Cette différence s'explique d'ailleurs facilement par l'amortissement beaucoup plus grand de l'alternateur A.

Les stabilisations varient peu. Elles conservent toujours des valeurs suffisantes, surtout dans le cas considéré où les couples moteurs sont parfaitement constants.

Nous avons cherché à abaisser la charge limite de l'alternateur B, au-dessus de laquelle le fonctionnement en parallèle est normal.

La discussion des formules montre qu'il suffit pour cela de sous-exciter cet alternateur.

En prenant $E_1 = 4000^V$, $E_2 = 3000^V$ nos équations précédentes deviennent:

$$W_1 = \frac{E_1 V_1 \sin \alpha_1}{\omega l_1} = \frac{180\,000 \times \overline{4000}^2}{\overline{3500}^2} - \frac{255\,000}{3500} \times 3000 \sin(\vartheta - \zeta) =$$

$$= 236\,000 - 220\,000 \sin(\vartheta - \zeta)$$

$$\frac{E_1 V_1 \cos \alpha_1}{\omega l_1} = \frac{500\,000 \times \overline{4000}^2}{\overline{3500}^2} - \frac{255\,000}{3500} \times 3000 \cos(\vartheta - \zeta) =$$

$$= 660\,000 + 220\,000 \cos(\vartheta - \zeta)$$

Digitized by Google

$$W_2 = \frac{E_2 V_2 \sin \alpha_2}{\omega l_2} = \frac{96\,000 \times \overline{3000}^2}{4000} + \frac{255\,000}{3500} \times 3000 \sin(\vartheta + \zeta) =$$

$$= 54\,000 + 220\,000 \sin(\vartheta + \zeta)$$

$$\frac{E_2 V_2 \cos \alpha_2}{\omega l_2} = \frac{160\,000 \times \overline{3000}^2}{\overline{4000}^2} + \frac{255\,000}{3500} \times 3000 \cos(\vartheta + \zeta) =$$

$$= 90\,000 + 220\,000 \cos(\vartheta + \zeta)$$

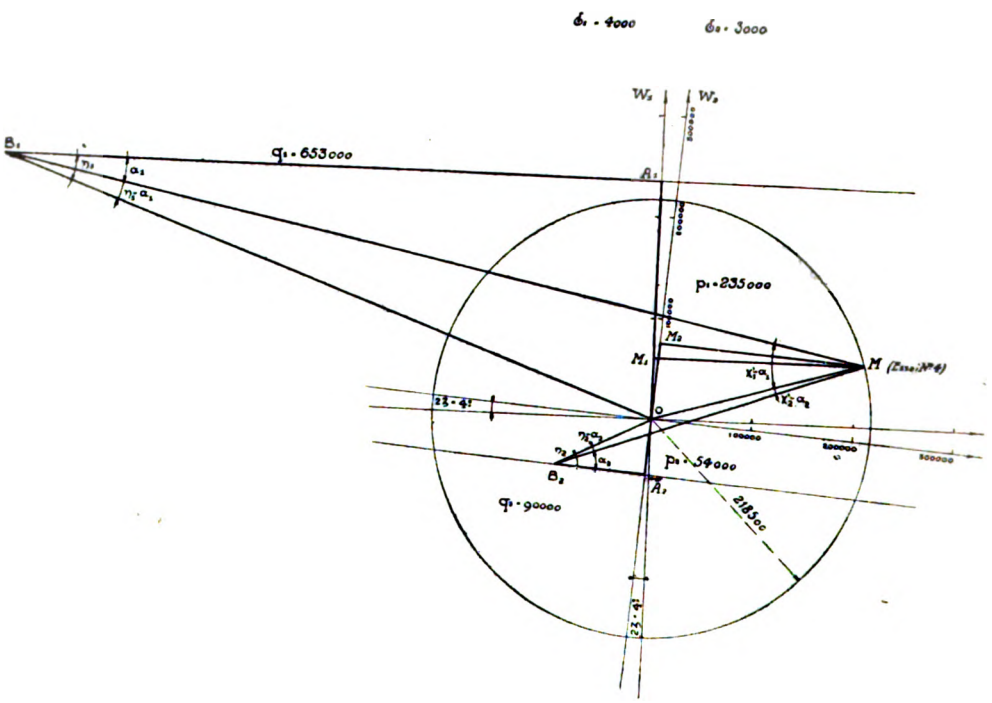


Fig. 7.

Le nouveau diagramme correspondant à ces équations est indiqué par la fig. 7.

Nous avons obtenu ainsi les résultats suivants, qui confirment parfaitement les prévisions théoriques:

$$E_1 = 4000 \qquad E_2 = 3000.$$

Digitized by Google

N. des Essais	Kws par phase		Volts par phase		Kws par phase				Conditions de la marche en parallèle
	W_1	W_2	V_1	V_2	S_1	S_2	σ_1	σ_2	
1	290	0	3200	2825	210	212	négligeable	0,18	Marche en parallèle impossible — décrochages après balancements progressifs.
2	240	50	3200	2950	220	220	0,0475	0,122	
3	202	100	3150	3000	216	212	0,089	0,071	Marche en parallèle assez stable.
4	168	133	3100	3015	208	202	0,124	0,039	Marche en parallèle parfaite
5	136	166	3050	3050	196	190	0,15	0	
6	100	200	2950	3000	170	160	0,19	— 0,048	Marche en parallèle stable avec oscillations continuelles d'une assez grande amplitude.

Les oscillations observées pendant l'essai n° 6 provenaient évidemment de la valeur élevée de σ_1 et de la diminution assez importante de S_1 et de S_2.

Les balancements importants qui précédaient les décrochages donnaient lieu à de très-faibles variations de tension; mais en même temps les aiguilles des ampèremètres d'excitation oscillaient fortement.

Nous avons effectué d'autres essais en modifiant les puissances absorbées par les réseaux particuliers de chaque installation.

L'expérience a verifié dans chaque cas les conditions de fonctionnement déduites *à priori* des diagrammes.

Sans entreprendre la discussion générale des équations, on peut se rendre compte de l'influence de la résistance de la ligne sur la marche en parallèle des 2 installations considérées, en établissant les diagrammes pour $\varrho = 0$.

On constate ainsi que les stabilisations augmentent — relativement peu d'ailleurs — et que les rapports σ deviennent généralement très petits dans le cas le plus défavorable — marche à vide de l'alternateur B et $E_2 = 4000$ — σ_2 ne dépasse pas 0,09.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. P. BOUCHEROT (Paris) *partage l'opinion que ce travail, qui contient des développements algébriques étendus, ne se prête guère à une discussion immédiate: il tient pourtant à observer que le problème de la marche en parallèle de plusieurs usines ne diffère pas sensiblement de celui de la marche en parallèle de plusieurs alternateurs d'une seule et même usine. La seule précaution nécessaire, dans le premier cas, est de tenir compte des constantes de lignes d'accouplement et de la situation des récepteurs.*

Digitized by Google

ÉTAT ACTUEL

DE LA

QUESTION DE LA DESTRUCTION DES ORDURES

en combinaison avec les Usines Électriques.

ÉTIENNE DE FODOR

Conseiller aulique, Directeur de la Société Générale d'Électricité de Budapest.

L'évacuation des ordures d'une ville est une des questions les plus importantes et les plus difficiles qui puissent occuper un conseil municipal. Dans la plupart des villes on transporte les ordures hors de la ville et on les tasse sur de vastes terrains. Dans deux villes: savoir à Budapest et à Munich, on transforme les ordures par travail mécanique dans des usines de triage spéciales, puis aux États-Unis de l'Amérique et dans quelques villes du continent, on travaille les ordures après les avoir triées et séparées en trois catégories qui sont: les cendres, les déchets et les ordures ménagères.

L'emploi le plus fréquent des ordures est leur utilisation comme engrais pour les terres sablonneuses et stériles. En France on prépare une poudre, ayant l'aspect du terreau et surnommé " poudre de gadoue „, par le broyage des ordures, et ceci devrait remplacer l'engrais artificiel. Cependant l'engrais d'ordure s'emploie toujours moins, de sorte que les ordures s'amoncelant devant les portes de la ville, le conseil municipal se voit forcé à s'occuper du problème de débarrasser la ville des ordures par un autre moyen.

Digitized by Google

La solution la plus radicale et la plus hygiénique semble être l'incinération des ordures, essayée pour la première fois d'une façon industrielle en Angleterre en l'année 1870. Après beaucoup d'efforts inutiles on réussit à construire un four convenable, dans lequel les ordures pouvaient être consumées sans developpement d'odeur et sans l'addition de combustibles étrangers, seulement grâce à leur propre pouvoir calorifique.

Le type de four anglais, comme il s'est développé dans le passé, est composé de cellules (1) revêtues de briques réfractaires, et contenant une grille formée de barres ou de plaques en fonte, au-dessous de laquelle se trouve un espace vide pour la tombée des cendres.

Dans le but d'obtenir une incinération complète, on se sert de jets de vapeur ou d'air injecté. Pour augmenter la durée des grilles on les refroidit par de l'eau ou par de l'air insufflé. Comme les ordures se vitrifient sous l'action du feu, et que les mâchefers pourraient adhérer aux parois des cellules, on revêtit celles-ci de boîtes latérales en fonte, afin que l'adhérence des mâchefers soit empêchée, et que l'enlèvement puisse se faire sans endommager la mâçonnerie. On peut désigner le système que je viens de décrire comme celui des *cellules isolées*.

Plus tard on trouva qu'il était plus avantageux de munir le four d'une seule chambre de combustion au lieu d'aligner dans le même four plusieurs cellules, séparées l'une de l'autre par des murs latéraux. Mais par contre on jugea bon d'aménager dans le four une longue grille, divisée en plusieurs sections, dont chaque section peut être chargée séparément, aussi bien que l'escarbillage se fait aussi séparément par section. Cet arrangement se nomme en Angleterre *continuous grate* ou grille continue.

Le chargement du four se fait ou par empellement des ordures par le devant ou par le derrière du four. Dans les usines plus importantes on fait monter les camions, chargés des gadoues recueillies, directement sur la plate-forme supérieure des fours, et on verse leur contenu par en haut dans les orifices des fours. De là on tire les ordures tombées en avant sur la grille qui forme un plan incliné. Pendant la combustion on fait attention à ce que les ordures soient toujours à l'état

(1) Ces cellules sont tantôt allongées côte à côte en une seule file, ou elles sont adossées par paire, une contre l'autre, formant file à double face.

Digitized by Google

d'incandescence dans une des cellules ou sur une des sections de la grille, pendant qu'elles ne brûlent qu'à demi dans la deuxième cellule et qu'elles se trouvent à l'état frais dans la troisième. Les gaz de combustion de toutes les cellules se mêlent dans un caniveau, ou dans une chambre de mixtion placée derrière les cellules, de sorte que les gaz provenant de la cellule à l'état d'incandescence avivent la combustion des matières non brûlées, contenues dans les gaz des autres cellules.

Le développement de l'incinération des immondices fut surtout grand en Angleterre. Rien que dans la ville de *Londres* on a érigé 14 établissements d'incinération, savoir: en 1884 dans le *City*, en 1888 dans les quartiers *Battersea* et *Hampstead*, en 1893 dans le quartier de *Woolwich*, en 1897 dans celui de *Shoreditch*, en 1898 dans *Lambeth*, en 1899 dans les quartiers de *Bermondsey*, *Finsbury* et *Wandsworth*, en 1900 dans ceux de *Stepney* et *Westminster*, en 1901 dans le quartier de *Fulham*, en 1902 dans le quartier de *Hackney* et en 1903 dans le quartier de *Plumstead*.

Le nombre des villes en Angleterre possédant un établissement d'incinération d'ordures est à peu près de 192.

Le développement de l'incinération des ordures ou gadoues en Angleterre ne pouvait manquer d'éveiller l'attention parmi les municipalités du continent, d'autant plus que la collection des ordures et l'enlèvement de ces matières encombrantes nécessitaient partout la création imminente d'une organisation systématique. En 1892 la commission des affaires techniques de la municipalité de *Hambourg*, inquiétée par une sérieuse épidémie de choléra, fit la proposition de construire sur le modèle anglais un établissement d'incinération, pouvant suffire à une population de 300,000 habitants. Cette proposition fit naître, comme cela était à prévoir, une opposition de la part de ceux qui soutenaient que l'incinération des ordures était un péché contre l'économie sociale, et qui voulaient réserver ces matières aux usages agricoles.

Dans ce temps-là cette objection sans fondement servait encore comme argument très efficace et peu s'en fallut que le projet d'incinération de Hambourg n'échouât. Mais à la fin le bon sens finit par emporter la victoire, et on décida définitivement la construction d'un établissement d'incinération; le premier sur le continent et, dans ces jours-là, le plus considérable du monde.

Digitized by Google

Quoique des constructeurs de four allemands se fussent proposés pour l'exécution du projet, on jugea meilleur de charger de l'érection de l'établissement des constructeurs anglais, dont l'expérience sur ce terrain était incontestable, parce qu'elle se basait sur un nombre d'usines déjà érigées, tandis que l'expérience des constructeurs allemands n'était fondée que sur quelques fours d'essai.

Bruxelles suivit l'exemple de Hambourg en 1903 en bâtissant un établissement d'incinération de grande étendue, et en adoptant avec peu de changements le même système de four anglais qui avait été déjà employé par Hambourg. Un an plus tard c'est *Zurich* qui construisit un établissement, toujours d'après le modèle anglais mentionné ci-dessus, et on aurait pu croire alors, que le système des fours à cellules isolées resterait prépondérant pour toutes les usines à venir. Mais la ville de *Frederiksberg* en Danemark abandonna la première sur le continent ce système, et employa déjà en 1902 un système de double-cellule munie d'une seule grille pour les deux cellules. Dans une autre ville du nord, à *Stockholm*, des constructeurs suédois employaient un four de leur système spécial, qui différait beaucoup des arrangements usuels, mais qui pouvait quand même se ramener au système de cellules isolées.

Dans ces établissements du continent, comme dans ceux plus anciens de l'Angleterre, les tendances étaient concentrées uniquement sur la destruction des ordures, sans qu'on eût un but secondaire devant les yeux. On employait la vapeur produite à chauffer des édifices municipales, ou des bains publiques, au pompage des eaux etc., parce qu'on ne savait mieux utiliser la chaleur gagnée. Mais l'excès de l'énergie superflue développée par l'incinération des ordures devait certainement éveiller l'attention générale, et des électriciens connus, comme p. e. Lord Kelvin et le Professeur Forbes en Angleterre, tournèrent l'attention des conseils municipaux sur le fait: qu'on pouvait obtenir avec un kilogramme d'ordures 1 $^1/_2$ kg. de vapeur tout au moins. La suite la plus logique semblait être l'emploi très avantageux de cette vapeur provenante des ordures, pour la production régulière de l'électricité.

Déjà en l'an 1896 la ville d'Oldham avait bâti son usine électrique dans le voisinage de l'établissement d'incinération des ordures, et une chaudière élevée dans celui-ci fournissait à l'usine d'électricité voisine une force de 120 HP, pendant qu'une

Digitized by Google

autre chaudière alimentait les propres besoins de l'établissement d'incinération.

C'est le conseil technique municipal de *Shoreditch* à Londres qui, lors des délibérations sur l'établissement d'une usine d'incinération des ordures, prit en considération sa combinaison possible avec une usine électrique, et c'est ainsi que le premier établissement d'incinération, combiné d'avance avec une usine électrique, fut bâti au milieu d'une métropole de premier ordre.

Ces sortes d'établissements combinés se succédèrent dès lors rapidement en Angleterre. Tels sont:

à Londres	dans	le	quartier	de	*Stepney*	en l'an	1899
„	„	„	„	„	*Fulham*	„ „	1901
„	„	„	„	„	*Hackney* . . .	„ „	1901
„	„	„	„	„	*Bermondsey* .	„ „	1902
„	„	„	„	„	*Woolwich* . . .	„ „	1903
en province	dans	les	villes	de	*Beckenham* . .	„ „	1900
„	„	„	„	„	*Gloucester* . .	„ „	1900
„	„	„	„	„	*Accrington* . .	„ „	1900
„	„	„	„	„	*Bangor*	„ „	1900
„	„	„	„	„	*Stipley*	„ „	1901
„	„	„	„	„	*Mexborough* etc.	„	1902

Tandis qu'en Angleterre l'incinération des ordures semblât être appelée à jouer un rôle important dans la production de l'électricité nécessaire aux villes, l'emploi de l'incinération sur le continent se faisait bien plus difficilement. On y fit l'expérience, que le pouvoir calorifique des ordures du continent était moindre à certaines époques et dans certaines villes qu'en Angleterre, et que par suite de ce pouvoir calorifique inférieur, la construction des fours continentaux devait être autre que celle des fours anglais. Tandis qu'en Angleterre on insufflait l'air de combustion sous la grille seulement sous une faible pression (60—100 $^{m}/_{m}$ de hauteur d'eau), en Allemagne les constructeurs élevèrent cette pression cinq et six fois plus haut, pour que l'air pût sûrement atteindre chaque particule de la matière combustible, et ceci nécessita aussi le changement de la grille. La grille à barres fut abandonnée et on la remplaça par une sorte de cuve en fonte, dans laquelle on entassa les ordures. Ses parois étaient munies d'ouvertures, d'où l'air insufflé sortait pour pénétrer dans la charge d'ordures. On ne dimen-

Digitized by Google

sionnait la surface de la grille que pour la réception d'une petite quantité d'ordures à la fois, et selon cet ordre on la choisit relativement petite; mais, par contre, on charge plus souvent les cellules et on les escarbille aussi plus souvent. On visa à atteindre une incinération aussi parfaite que possible, et à obtenir comme produit final des scories bien vitrifiées, ne contenant plus de matière non brûlée. On s'efforçait à rendre utilisable toute portion de la chaleur amassée dans l'ensemble du four, et d'empêcher par des *economisers* et *recuperators* les pertes de chaleur si fréquentes dans les anciens systèmes. Même le peu de chaleur, contenu dans les escarbilles retirées du four, a été mis en contribution pour chauffer préalablement l'air entrant dans les fours. L'escarbillage, une des opérations les plus désagréables dans le fonctionnement des usines d'incinération d'ordures, devait être fait mécaniquement en supprimant le râclage usité jusqu'alors, et le gâteau des scories devait être retiré d'un seul coup de la cellule, d'où on l'avait sorti auparavant en le brisant préalablement en morceaux.

En prenant pour base ces principes, de nouveaux établissements d'incinération furent bâtis à *Wiesbaden*, *Miskolcz*, *Kiel*, *Brunn*, *Francfort*-sur-le-M., *Barmen* et *Furth*, appartenants tous au système des cellules isolées.

Mais le développement de la grille continue ne resta pas non plus en arrière. Des constructions de cette espèce furent faites à *Paris*, *Ixelles*, *Le Havre*, *Rouen*, *Milwaukee*. Un grand établissement du même système est actuellement en construction à *Rotterdam*.

Des soins exceptionnels furent également concentrés sur le mode de chargement des fours, et au lieu de l'exécuter par travail manuel on finit par employer, après beaucoup d'essais laborieux, des appareils de chargement automatique. Des constructions de cette catégorie se trouvent sur le continent à *St-Pétersbourg*, *Zurich*, *Furth*, ainsi que dans de nombreuses villes de l'Angleterre.

Ces établissements du continent, différents du type original anglais, virent le jour au milieu de la rivalité de beaucoup de constructeurs, qui ne considéraient plus cependant l'incinération des ordures comme une institution purement hygiénique, mais plutôt industrielle; et, à cette occasion, ils garantissaient volontiers des *chiffres de vaporisation*, et s'engageaient à fournir une certaine quantité de vapeur par kilogramme d'ordures.

Digitized by Google

A chaque nouvel établissement du continent, il était décidé, dès les premiers moments, qu'il servirait également à la production d'électricité, ou qu'il serait attaché aux usines électriques déjà existantes (1); et ainsi, les fours d'incinération ne furent plus considérés comme destructeurs de gadoue, mais bien comme des établissements de chaudières à vapeur, utilisant un combustible médiocre.

Pour ce qui concerne la qualité de ce combustible inférieur, il est tout naturel, que son pouvoir calorifique varie selon les saisons et selon les circonstances locales. Là, où l'on brûle beaucoup de *charbon de terre*, la valeur calorifique des ordures ménagères est meilleure. Par les mêmes circonstances le pouvoir calorifique sera plus grand dans quelques villes anglaises qu'autre part, parce qu'on y brûle du charbon de terre de bonne qualité, tandis que, dans certaines villes du continent, les petits ménages emploient du lignite de moins bonne qualité. Les ordures en Angleterre contiennent plus de charbon non brûlé, parce qu'on y consume le charbon dans des cheminées ouvertes, tandis que chez nous, ce sont les poêles économiques fermés qui sont en plus grand nombre (2).

A Berlin, on brûle en grande quantité des briquettes préparées de lignite, desquelles il ne reste presque pas de résidus combustibles; de sorte que la valeur calorifique des ordures de Berlin est la plus petite parmi celles de toutes les villes de l'Allemagne. En outre la cendre provenant de ces briquettes est nuisible, parce qu'elle enveloppe les matières combustibles contenues dans les ordures et empêche leur combustion économique. Si cette cendre de briquettes était extraite des ordures

(1) On se sert souvent de la combinaison: à établir l'usine d'incinération comme un établissement indépendant, mais en renonçant d'y produire l'électricité. On s'y borne à produire seulement de la vapeur, qui est amené par des conduites plus ou moins longues à l'usine d'électricité, en débouchant dans la tuyauterie de vapeur de cette dernière.

(2) Le tableau de la composition moyenne des ordures de *Londres* d'après leur pesanteur est le suivant: Cendres 47·00, charbon et restes de coke 25·55, papier, paille et débris végétaux 13·15, poussière 9·75, porcelaine 1·72, métaux 0·68, chiffons 0·40, verre 0·37, charbon pur 0·35, coke pur 0·37. D'après ce tableau les ordures de Londres ne diffèrent pas de beaucoup de celles des villes continentales. Mais, par contre, au Nord et aux Midlands de l'Angleterre, il y a des villes dont la valeur calorifique des ordures est de 50 % plus grande que celle de Londres.

Digitized by Google

de Berlin, la valeur calorifique en serait tout de suite plus grande. Si l'on voulait tirer un jugement d'après les expériences passablement défectueuses, on pourrait prétendre qu'en hiver les ordures de Berlin ne sont combustibles qu'avec l'addition de matériaux étrangers, tandis qu'en été elles brûlent sans aucune addition, par leur propre pouvoir calorifique. Les ordures des villes de *Potsdam* et de *Magdebourg* etc. ont une valeur calorifique aussi modeste que celles de Berlin.

La valeur calorifique des ordures ménagères varie aussi d'après les *quartiers* des villes; elle est d'autant plus grande que la population est nombreuse dans un quartier; on pourrait même dire: d'autant meilleure que les habitants d'un quartier sont pauvres. La grande partie des débris de paille, de chiffons, d'os, de cuir, etc., provient de ces quartiers-là. C'est également dans ces quartiers qu'on trouve le plus de charbon dans les ordures ménagères, parce que les fourneaux et poêles de la population pauvre sont munis de grilles défectueuses, et ces pauvres gens emploient, en outre, du charbon très bon marché, qui s'émiette et se vitrifie très facilement.

La valeur calorifique varie de même après l'*alimentation* des habitants. Les ordures des villes allemandes sont une fois et demi plus riches en déchets végétaux, que celles des villes anglaises.

Le changement de la valeur calorifique d'après les *saisons* est considérable. En été, ce n'est pas seulement le charbon de chauffage qui vient à manquer, mais les ordures qu'on ramasse, contiennent énormément d'humidité: ainsi les débris de fruits, de légumes, de feuillage vert, de gazon, etc. Les ordures de Budapest sont remarquables surtout en automne, en ce qu'elles contiennent à cette époque beaucoup d'écorces de melon et de rafles de maïs. Le même phénomène est à constater à *New-York* et dans les autres villes de l'Amérique, dans lesquelles les débris végétaux forment plus que la cinquantième partie des ordures ménagères; et ici, ce sont aussi les écorces de melons et les rafles de maïs qui jouent le rôle principal.

Un tableau de l'usine d'incinération de Frederiksberg démontre la variation de la *teneur en humidité* d'après les saisons. La teneur en humidité est:

en Janvier . . . . de 22 % du poids total
„ Février . . . . „ 21 „ „ „ „

Digitized by Google

en Mars	de 21	%	du	poids	total
„ Avril	„ 23	„	„	„	„
„ Mai	„ 25	„	„	„	„
„ Juin	„ 35	„	„	„	„
„ Juillet	„ 40	„	„	„	„
„ Août	„ 40	„	„	„	„
„ Septembre . . .	„ 38	„	„	„	„
„ Octobre	„ 35	„	„	„	„
„ Novembre . . .	„ 31	„	„	„	„
„ Décembre . . .	„ 25	„	„	„	„

Quant aux *chiffres des vaporisations* obtenus, je les ai recueillis d'abord dans les villes anglaises et j'en ai fait le tableau suivant:

Essais de vaporisation dans quelques usines d'incinération anglaises.

Nom de la ville	Nombre des chaudières	Surface de chauffe des chaudières en m²	Nombre des chaudières sous essai	Nombre des cellules sous essai	Surface de grille sous essai	Température des gaz de combustion	Vaporisation d'eau de 100° C en vapeur de 100° C par kg. d'ordures
St-Albans	2	365	1	3	4-0	1140 moyenne	**2-75**
Kings Norton . . .	3	548	1	3	6-96	1167 maximum	**2-63**
Burslem	1	182	1	3	6-96	1260 maximum	**2-16**
Bury St-Edmunds	1	162	1	2	4-64	1102 moyenne	**2-04**
Gloucester	2	239	1	1 double	6-13	971 moyenne	**2-02**
Plumstead	3	510	1	3	6-96	1315 maximum	**1-917**
Redditch	1	136	1	3	6-96	1086 moyenne	**1-9**
Shildon.	2	364	2	3	6-96	993 moyenne	**1-89**

Digitized by Google

Nom de la ville	Nombre des chaudières	Surface de chauffe des chaudières en m²	Nombre des chaudières sous essai	Nombre des cellules sous essai	Surface de grille sous essai	Température des gaz de combustion	Vaporisation d'eau de 100° C en vapeur de 100° C par kg. d'ordures
Mansfield	2	240	2	2 doubles	9-29	1343 maximum	**1-8**
Stocke Newington	2	323	1	3	6-96	1012 moyenne	**1-8**
Rathmines Dublin	2	273	1	3	6-96	au-dessus de 1092	**1-78**
Worthing	2	162	2	2	5-1	1152 moyenne	**1-69**
Bermondsey	4	548	2	4	9-29	898 moyenne	**1-657**
Ayr	1	265	1	4	9-29	1350 maximum	**1-58**
Cheltenham	2	430	1	4	9-29	1004 moyenne	**1-577**
St-Helens	2	324	1	2	4-64	1092 maximum	**1-54**
Fulham	6	702	6	12	33-4	1038	**1-53**
Canterbury	1	150	1	2	4-64	1192 maximum	**1-51**
Beckenham	3	396	2	3	8-36	925 moyenne	**1-512**
Hackney	3	795	3	12	27-87	1537 maximum	**1-415**
Greenock	3	576	2	4	7-43	982/1092 moyenne	**1-41**
Stockton	1	68	1	2	5-57	1150 maximum	**1-34**

Digitized by Google

Nom de la ville	Nombre des chaudières	Surface de chauffe des chaudières en m²	Nombre des chaudières sous essai	Nombre des cellules sous essai	Surface de grille sous essai	Température des gaz de combustion	Vaporisation d'eau de 100° C en vapeur de 100° C par kg. d'ordures
Dunoon	2	180	1	2	5-57	1038 moyenne	**1-33**
Acton	2	324	1	2	4-64	1150 maximum	**1-28**
West Hartlepool .	1	222	1	6	16-71	1206 moyenne	**1-61**
Bradford.	2	445	2	12	33-42	1027 moyenne	**1-25**
Moss Side	2	204	2	6	16-71	1038 moyenne	**1-25**
Pembroke	2	136	1	2	5-57	1092 maximum	**1-21**
Salisbury	2	136	2	2	5-57	1092 maximum	**1-23**
Wellington (N. Z.).	3	548	1	3	7-66	1132 moyenne	**1-925**

De ce tableau il résulte que l'on obtient dans quelques usines d'incinération anglaises des chiffres de vaporisation tellement favorables, que l'on peut qualifier les ordures du nom de *combustible.*

Mais puisque, en général, le pouvoir calorifique des ordures du continent n'atteint pas celui des ordures d'Angleterre (1), nous devons plus particulièrement nous occuper des chiffres de vaporisation obtenus sur le continent. En jugeant de ces chiffres, nous devons, avant tout, ne pas considérer les usines d'*Hambourg*, de *Bruxelles* et de *Zurich*; car, lors de leur création, on n'avait nullement prévu une utilisation quelque peu intense de l'énergie, c'est-à-dire on n'avait jamais songé à combiner une telle usine

(1) Il y a en Angleterre aussi assez d'endroits où la valeur calorifique est très petite; mais, par contre, il y a des places, surtout dans les districts industriels, où la valeur calorifique des ordures égale presque le quart du pouvoir calorifique du meilleur charbon de terre.

Digitized by Google

avec une station centrale d'électricité. Ces établissements ne pourront être employés à la production industrielle d'électricité qu'après d'importantes transformations.

Ainsi, par exemple, à *Bruxelles* l'énergie obtenue n'est employée qu'à actionner des moteurs existants de l'usine et pour l'éclairage de l'établissement. L'énergie superflue s'envole inutilisée par la cheminée. Mais, par contre, tout près de Bruxelles, dans la commune d'*Ixelles*, se trouve un établissement d'incinération tout à fait moderne, muni seulement de deux fours. Dans cet établissement le surplus de chaleur est employé à la production de l'électricité, et on obtient par kilogramme d'ordures (les balayures des rues y comprises) une quantité moyenne de 0.955 kg. de vapeur.

A *Zurich*, l'énergie obtenue est employée à l'éclairage de l'établissement, ainsi qu'à la mise en mouvement des moteurs; une autre petite partie en est employée à des entreprises industrielles dans le voisinage de l'établissement. Le reste est encore inutilisé. En outre la vapeur nécessaire au chauffage à l'eau chaude du bâtiment d'administration est également fournie. Par un essai de l'été de l'année 1905 avec l'emploi d'ordures de très petite valeur calorifique, on a obtenu 0.63 kg. de vapeur par kilogramme d'ordures; ce qui correspondrait, avec l'emploi d'ordures d'hiver, à un résultat de 0.88 kg. de vaporisation. L'établissement subit actuellement des transformations, et on atteindra facilement une valeur de 0.9 de vaporisation, une fois les changements terminés.

L'usine de *Wiesbaden* ne peut pas non plus être considérée comme échantillon pour ce qui concerne la production économique de vapeur, à cause de sa mise en exploitation par intervalles, puis à cause de différents changements considérables opérés pendant son érection, et enfin à cause de l'installation ultérieure des chaudières de réserve qui a eu lieu pendant l'hiver de l'année précédente. Toutes ces causes nous empêchent de juger des résultats que l'on pourrait obtenir en exploitation continuelle et régulière. Mais, malgré ces circonstances fâcheuses, il est à constater que, par kilogramme d'ordures, on a obtenu 0.9 kg. de vapeur.

Parmi les plus anciens établissements d'incinération, c'est celui de *Frederiksberg*, qui tient une statistique exacte de la vaporisation obtenue depuis plusieurs années. Les résultats de l'année de 1909 s'y rapportant sont les suivants:

Digitized by Google

Janvier	**0.79**	kg. de vapeur par kg. d'ordures
Février	**0.85**	" " " " " "
Mars	**0.86**	" " " " " "
Avril	**0.85**	" " " " " "
Mai	**0.69**	" " " " " "
Juin	**0.65**	" " " " " "
Juillet	**0.68**	" " " " " "
Août	**0.62**	" " " " " "
Septembre . . .	**0.77**	" " " " " "
Octobre	**0.80**	" " " " " "
Novembre . . .	**0.78**	" " " " " "
Décembre . . .	**0.80**	" " " " " "

Les essais faits avec les ordures de *Paris* donnèrent les résultats suivants:

Usine où l'essai a eu lieu	Période de l'année	Pression de la vapeur à la chaudière	Quantité de vapeur produite par kg. de gadoue brûlée	Observations
St-Ouen	Été	—	**0-645**	Mise en marche des fours, rendements croissants dûs sans doute à l'échauffement progressif des maçonneries.
"	"	12-00	**0-892**	
"	"	12-00	**0-991**	
"	"	10-80	**0-849**	Mauvais tirage à la cheminée.
"	"	11-75	**1-170**	—
"	"	11-75	**1-300**	
"	"	10-80	**0-972**	Emploi partiel du by-pass.
Issy	Hiver	11-50	**1-390**	
"	"	10-00	**1-071**	
"	"	—	**8-842**	Les gaz n'ont passé qu'en partie sous les chaudières, l'autre partie a été dérivée par les by-pass.

D'après les informations que j'ai prises aux endroits mêmes, on peut obtenir les vaporisations suivantes, en moyenne, dans les villes ci-dessous:

Digitized by Google

Malmö	**1.06**	kg. de vapeur par kg. d'ordures
Stockholm . . .	**1.40**	" " " " " "
Mayence	**1.30**	" " " " " "
St-Pétersbourg . .	**1.16**	" " " " " "
Königsberg . . .	**1.07**	" " " " " "
Aix-la-Chapelle . .	**1.00**	" " " " " "
Barmen	**1.00**	" " " " " "
Francfort . . .	**1.00**	" " " " " "
Furth (Bavière) .	**1.00**	" " " " " "
Copenhague . . .	**0.92**	" " " " " "
Hanovre	**0.91**	" " " " " "
Amsterdam . . .	**0.90**	" " " " " "
Christiania . . .	**0.89**	" " " " " "

Nous arrivons à un établissement plus récent dont les résultats de vaporisation ont été mis également en statistique exacte. Ces résultats sont ceux obtenus en 1909 à *Brunn*:

en Janvier	**1.06**	kg. de vapeur
" Février	**1.06**	" " "
" Mars	**1.16**	" " "
" Avril	**1.04**	" " "
" Mai	**1.13**	" " "
" Juin	**1.13**	" " "
" Juillet	**0.99**	" " "
" Août	**0.90**	" " "
" Septembre	**1.22**	" " "
" Octobre	**0.95**	" " "
" Novembre	**0.90**	" " "
" Décembre	**0.99**	" " "

De sorte que la production moyenne est de **1.04** kg. de vapeur par kilogramme d'ordures.

En jugeant de ces résultats, il faut prendre en considération que l'établissement ne travaille que 16 heures par jour, et que les résultats seraient bien meilleurs encore, s'il y avait un service continu de 24 heures par jour de travail. Que les résultats de Brunn ne se rapportent pas seulement à ce court espace de temps ci-mentionné, mais à plusieurs années de travail; ceci est démontré par le tableau qui va suivre, et qui comprend le résultat de l'exploitation de 4 ans:

Digitized by Google

Quantité de vapeur par kilogramme d'ordures obtenu à Brunn:

	1906 kg.	1907 kg.	1908 kg.	1909 kg.
Janvier	1.01	0.92	—	1.06
Février	1.12	1.04	—	1.06
Mars	1.03	—	—	1.16
Avril	0.975	—	—	1.04
Mai	1.03	—	1.05	1.13
Juin	1.06	0.99	1.04	1.13
Juillet	1.03	1.07	1.14	0.99
Août	1.04	—	1.03	0.90
Septembre . . .	1.10	—	1.30	1.22
Octobre	1.02	—	1.14	0.95
Novembre . . .	0.995	—	1.04	0.90
Décembre . . .	0.96	—	1.05	0.99

De ces chiffres de vaporisation relatés jusqu'ici on peut tirer la conclusion, que dans la plupart des villes continentales où l'on brûle aussi du charbon de terre dans les ménages, on peut compter en moyenne sur *1 kg. de vaporisation par kilogramme d'ordures.* Ceci est un chiffre que les constructeurs de fours promettent sans restriction, et ils réussissent à le faire passer en pratique.

***

Pour nous former une idée des *résultats d'exploitation* obtenus dans quelques usines d'incinération, j'ai dressé, en me basant sur des informations authentiques, le tableau **A**.

Digitized by Google

A) Résultats d'exploitation obtenus dans quelques usines d'incinération continentales en 1910.

Nom de la ville	Chaudières chauffées par les ordures			Machines à vapeur		Totalité des kilowatt-heures produites par les ordures	Ont été employées pour les propres besoins de l'usine: kilowatt-heures	Du reste du courant utilisable on a distribué: kilowatt-heures	
	Nombre	Surface de chauffe m^2	Type	Nombre	Capacité en HP				
Frankfurt-s.-M.	6	750	Tubes d'eau horizontales	2	1000	2,290.143	377.039	984.316 614.310 314.478	au réseau électrique municipal au service des eaux municipal pour l'usine de purification des eaux d'égout
Barmen	3	420	Tubes de fumée verticales	1	600	1,400.000	[1]) 300.000	1,100.000	au réseau électrique municipal
Brunn	2	424	Tubes d'eau horizontales	2	675	809.062	138.615	670.447	au réseau électrique municipal
Frederiksberg .	3	615	Tubes d'eau horizontales	2	340	[2]) 496.187	193.885	120.869 2.919 125.514 53.000	à l'hôpital municipal au service des eaux municipal à des abonnés privés pertes dans le réseau et dans les accumulateurs
Zurich	3	410	Tubes d'eau horizontales	1	220	180.347	130.751	36.473 13.123	à une fabrique de meubles à un atelier de construction
Kiel.	3	510	Tubes d'eau horizontales	1	80	—	—	—	L'éclairage de l'usine s'effectue par une dynamo de 20 KW. La vapeur produite sert principalement à l'alimentation de l'usine de traitement des boues de la ville, située sur un terrain avoisinant.

[1]) Dans ce chiffre est compris le courant fourni aux moteurs de la condensation de la turbine, du tirage forcé, du concasseur des scories, de l'atelier de réparation et aussi le courant pour l'éclairage de toute l'usine et ses environs.
[2]) La vapeur produite est en grande partie employée pour le chauffage de l'hôpital voisin.

Digitized by Google

J'ai essayé de me construire une statistique des résultats d'exploitation obtenus dans le pays d'origine de l'incinération des ordures: en Angleterre. Je me suis adressé à toutes les municipalités anglaises possédant une usine d'incinération, en leur soumettant un questionnaire détaillé, mais le résultat de mes investigations manque d'être satisfaisant. J'ai pu constater qu'il y a en Angleterre environ 60 usines d'incinération qui fournissent du courant électrique à la ville (1). Parmi ces usines il y en a fort peu où l'on tient des statistiques propres à établir combien d'énergie on a obtenu par l'incinération seule. En beaucoup de ces usines les chaudières actionnées par l'incinération travaillent parallèlement avec les chaudières chauffées par le charbon, et, par conséquent, on ne peut établir dans la production totale de vapeur de l'usine électrique la partie exacte incombant à l'incinération des ordures. De tous les détails, qui m'ont été fournis par les ingénieurs des villes anglaises, j'ai dressé à titre d'échantillon le tableau **B**.

---

(1) Des usines d'incinération combinées avec une usine électrique il y en a, selon ma connaissance, en Angleterre dans les villes suivantes:

Accrington
Ayr
Bangor
Barrow-in-Furness
Batley
Beckenham
Bermondsey
Birmingham
Blackpool
Bradford
Buxton
Burslem
Bury St-Edmunds
Canterbury
Cheltenham
Chester
Clydebank
Colne
Coventry
Dorking
Dublin
Elland
Farnworth
Fleetwood
Fulham
Gloucester
Gravesend
Grays
Greenock
Grimsby
Hackney
Hertford
Heston and Isleworth
Holyhead
Kettering
Liverpool
Llandudno
Mansfield
Mexborough
Nelson
Northampton
Nottingham
Partick
Pembrocke
Pontypridd
Preston
Redditch
Rotterham
Rhyl
St-Helens
Shildon and East Thikley
Shoreditch
Shypley
Stepney
Wakefield
Warrington
Wimbledon
Wolverhampton
Woodgreen
Woolwich

Digitized by Google

B) Résultats d'exploitation obtenus dans quelques usines d'incinération anglaises en 1910.

Nom de la ville	Chaudières chauffées par les ordures			Machines à vapeur		Totalité des kilowatt-heures produites par les ordures	Ont été employées pour les propres besoins de l'usine: kilowatt-heures	Du reste du courant utilisable on a distribué: kilowatt-heures	
	Nombre	Surface de chauffe m^2	Type	Nombre	Capacité en HP				
Preston	4	363	Bouilleur	2	900	1,323.896	213.881	1,110.015	au réseau électrique municipal
Nottingham . .	6	406	Tubes d'eau	3	720	1,215.129	?	534.036	au réseau de tramway municipal
								681.093	au réseau électrique municipal
Greenock	3	1730	Tubes d'eau	?	?	1,208.336	147.315	1,161.021	au réseau électrique municipal
St-Helens. . . .	2	320	Tubes d'eau	2	600	568.096	180.927	387.169	au réseau électrique municipal
Bradford	2	440	Tubes d'eau	1	450	374.050	?	352.910	au réseau électrique municipal
Heston and Isleworth	2	460	Tubes d'eau [1])	4	1200	368.371	211.019	157.352	au réseau électrique municipal
Mexborough . .	3	170	Bouilleur [1])	1	160	355.000	16.410	310.148	au réseau électrique municipal
Farmouth . . .	1	100	Bouilleur	1	200	340.350	4.779	335.571	au réseau électrique municipal
Colne.	1	145	Tubes d'eau	1	150	90.227	[2]) ?	90.227	au réseau électrique municipal
Blackpool . . .	2	?	Tubes d'eau	2	245	66.000	?	58.000	pour l'éclairage des édifices municipaux
								8.000	au réseau électrique municipal

[1]) Ces chaudières sont arrangées de façon à pouvoir être chauffées aussi avec du charbon.

[2]) Le courant produit pour les propres besoins de l'usine n'est pas registré par des compteurs: un fait qui est commun à beaucoup d'usines anglaises.

Digitized by Google

Pour obtenir une vaporisation avantageuse et surtout constante, on doit porter ses efforts en premier lieu sur un fonctionnement de durée ininterrompue, et on doit éviter le plus possible une extinction des fours, parce que leur réchauffage ne pourra se faire qu'avec un gaspillage du combustible.

Pour atteindre ce but, on devra à l'usine prendre soin de l'emmagasinement convenable des gadoues apportées, de sorte que le combustible disponible soit également réparti pour toute la journée. Ceci rendra aussi possible la mise en accord de la production courante de l'établissement d'incinération avec les nécessités temporaires de l'usine électrique. Le soir, le courant produit par l'établissement peut contribuer et aider à enlever la pointe de la courbe de la plus haute production, tandis que, pendant le reste de la journée, il pourra être employé le plus avantageusement en chargeant des accumulateurs, qui emmagasinent le courant pour les besoins particuliers de l'établissement, pour les souffleries, pour les pompes, pour les concasseurs des scories etc., tandis que le surplus passera directement ou par moyen des transformateurs dans les réseaux distributeurs d'électricité.

Une combustion continuelle comporte en soi une production de vapeur continuelle. Plus l'usine d'incinération est restreinte, et plus le nombre des cellules de combustion existantes est petit: plus les oscillations produites par la qualité changeante du combustible seront sensibles dans la production et dans la tension de la vapeur. Or le pouvoir calorifique des gadoues varie non seulement journalièrement, mais il peut varier d'un moment à l'autre. On sera donc obligé de trouver un moyen de recompensation ou d'égalisation à ces fluctuations continuelles, et ici encore les *accumulateurs* se montreront d'une utilité parfaite. L'égalisation des oscillations peut être cependant aussi réglée par une *chaufferie de secours*, qui, en cas de besoin, pourra facilement être mise en action et arrêtée tout aussi facilement. Dans des usines anglaises comme dans celles du continent, de telles chaufferies de secours ont déjà été mises en pratique réitérativement, en ce que dans ces usines les chaudières des fours d'incinération sont aussi aménagés pour le chauffage au charbon ou au coke, qui peut être mis en fonction selon la nécessité. Dans quelques usines on avait déjà prévu d'avance que les chaudières marcheront dans la soirée exclusivement avec du charbon, tandis que le chauffage aux ordures est réparti sur le

Digitized by Google

reste de la journée. Le *chauffage à l'huile* est également usité comme assistance en cas de besoin.

Il est tout naturel que la vapeur obtenue ne doit être employée que dans des machines à vapeur d'une consommation économique. Malheureusement presque toutes les machines à vapeur installées jusqu'ici dans les usines d'incinération font un vrai gaspillage de l'énergie qui leur est amenée (1). Une autre et très importante nécessité est celle de la *restriction au possible des besoins propres de l'usine même.* La force nécessaire aux pompes des chaudières peut être réduite à un minimum. Celle qui est nécessaire au tirage forcé, à la manipulation des ordures et scories et à la transformation des scories en produits de quelque prix, exige un contrôle sévère. Sans ce contrôle, il peut facilement arriver que quelques établissements d'incinération dépensent pour leurs propres besoins plus de 30 % de l'énergie produite, tandis que d'autres, dans les mêmes circonstances, n'emploient que 15 % de toute la production de vapeur pour leurs propres besoins. L'exemple de *Brunn* montre comment les faux frais d'une usine peuvent être diminués sous une direction sage.

Pour les propres besoins de l'établissement, on a employé

en 1906	31-5 %	de toute l'énergie produite.
„ 1907	28-0 „	
„ 1908	19-8 „	
„ 1909	18-9 „	
„ 1910	17-1 „	

***

Nous devons nous occuper maintenant des produits secondaires des usines d'incinération, produits pouvant contribuer à l'augmentation de la rentabilité de l'établissement, s'ils sont conve-

(1) Je cite par hasard une des plus récentes usines d'incinération, celle de *Barmen*, où la turbine de vapeur installée consomme 10 ½-11 kg. vapeur par kilowatt-heure produite. Cette usine a livré en une année 1,100,000 kilowatt-heures au réseau électrique de la ville. En employant une turbine à vapeur plus économique, qui ne consomme que 8 ½-9 kg. de vapeur, cette usine aurait pu livrer 1,700,000 kilowatt-heures à la ville.

Digitized by Google

nablement exploités, mais qui peuvent facilement devenir une charge par suite d'une mauvaise organisation.

Les restes de *cendres* et de *scories* après la combustion des ordures sont considérables. Tandis qu'ils forment dans quelques villes anglaises 35 % du poids total des ordures, sur le continent il y a des ordures dont ces restes égalent 60 %. Les établissements anglais furent munis très tôt de concasseurs pour *broyer les scories*. La matière ainsi obtenue fut tamisée en grains de différentes grosseurs, et fut employée à l'arrangement et à la réparation des chemins, à quelle occasion le gros grain sert de base de drainage et le grain moyen de couverture. La scorie broyée s'emploie dans les nouvelles bâtisses pour *remplir les plafonds*, et on la préfère à la scorie de charbon employée jusqu'à présent, parce que la scorie d'ordures ne contient pas de soufre. Le grain fin de la scorie broyée peut être employé comme *remplaçant le sable* dans les travaux de pavement, etc. On peut répandre de la scorie finement broyée au lieu de sable sur les chemins en temps de verglas.

Autant que je sache, l'écoulement des scories tamisées ne cause aucune difficulté: dans quelques villes la production ne peut même pas suffire aux demandes. Naturellement qu'en hiver, lorsque les travaux de chaussée comme les constructions en bâtiment chôment, il est compréhensible qu'alors les résidus s'accumulent dans les usines d'incinération; et voilà les fameux " Monts de scorie „ sur lesquels les adversaires de l'incinération des ordures fondent leurs racontages. Si la qualité des scories est bonne, le conseil municipal d'une ville est toujours à même de s'assurer l'écoulement des produits pour les propres besoins de la ville. Comment l'affaire doit-elle être menée? Le conseil municipal de *Brunn* nous le montre, en prescrivant l'emploi des scories comme matériel de terrassement pour toutes les constructions dépendant de la municipalité, et en les prescrivant pour remplacer le sable dans la préparation du mortier dans toutes les constructions municipales.

La scorie contient conjointement avec de la terre argileuse: de la chaux, des alcalis etc., une grande partie d'*acide silicique*, de sorte qu'elle peut très bien être employée non seulement à la confection d'un bon mortier, mais aussi à la *manufacture de briques* et de pierres artificielles.

D'après les expériences faites, j'ai pu établir ainsi qu'il suit la composition de la scorie:

Digitized by Google

	en Angleterre:	en Allemagne:	
Acide silicique (SiO_2)	41 %	53 %	51 %
Chaux (CaO)	11 „	7 „	18 „
Terre argileuse (Al_2O_3)	19 „	12 „	11 „
Oxyde de fer (FeO_3)	22 „	20 „	14 „
Magnésium (MgO) et alcalis	7 „	8 „	6 „

D'autres expériences ont démontré que le contenu en acide silicique varie constamment entre 40 et 50 %, de sorte que la scorie bien vitrifiée et convenablement broyée peut toujours *remplacer le gravier* dans la préparation du béton.

Les briques faites de scorie peuvent rivaliser avec les meilleures briques d'argile. D'après ce que j'ai pu voir par moi-même, ces briques sont employées en Angleterre, surtout dans les constructions techniques pour les fondations et murs, pour les ponts et remblais de chemin de fer etc. Nous savons qu'en Angleterre il y a tout ce qu'il faut pour la fabrication de bonnes briques, c'est-à-dire de la bonne argile et du charbon bon marché, et c'est à cause de cela que la brique calcaire n'y pourra supplanter l'emploi habituel des briques en argile plus légères. Toutefois les possibilités de l'utilisation des briques calcaires de scorie augmentent aussi dans ce pays. Mais dans les pays où les briques de sable et de chaux ont un emploi très étendu, comme en Allemagne, en Hollande, aux États-Unis, etc., les briques de scorie, si elles sont manufacturées de scorie de très bonne qualité, peuvent être mises sur le même rang que les briques de sable et de chaux: la fabrication des deux sortes de briques est égale.

Par les mêmes qualités, qui rendent possible l'emploi de la scorie broyée à la préparation des briques, elle est également utilisable à la préparation du *béton* en remplaçant le gravier. Ce genre d'emploi fut commencé de bonne heure en Angleterre, et des produits les plus primitifs de cette utilisation sont les " flags „ ou dalles, qui servent au pavage des trottoirs ou de rues peu fréquentées.

Une fois la constatation faite que la scorie pouvait non seulement égaler le gravier, mais pouvait aussi lui être préférée, on se mit à fabriquer avec la scorie des articles de béton de toutes les formes, surtout des tuyaux et conduites de large diamètre. Ces produits furent mises à l'épreuve partout pour en connaître la force de résistance, et je citerai les résultats de Brunn.

Digitized by Google

Les épreuves de résistance furent faites par l'Institut expérimental pour matériel de constructions et de machines du musée impérial et royal d'industrie technologique à Vienne. Tous les cubes servant aux épreuves avaient une longueur latérale de 20 cm. Les cubes mentionnés sur le tableau *B* furent posés après leur malaxage dans du sable humide pendant six semaines; après quoi les épreuves de résistance furent faites. Les cubes cités sur le tableau *A* entre les numéros II — IX furent six semaines, les cubes de X — XVII trois semaines à sécher lentement.

Tous les cubes de II à XVII sont formés d'un mélange du dosage suivant:

1 partie de ciment de Portland,
4 „ de sable de rivière,
6 „ de grosse scorie d'ordures.

Tableau *A*.

N° du cube	Force de résistance en kg. par cm²	Poids du volume	N° du cube	Force de résistance en kg. par cm²	Poids du volume
II.	**146**	2-11	X.	**119**	2-09
III.	**139**	2-07	XI.	**123**	2-10
IV.	**154**	2-08	XII.	**122**	2-11
V.	**178**	2-14	XIII.	**120**	2-17
VI.	**167**	2-09	XIV.	**145**	2-05
VII.	**156**	2-07	XV.	**124**	2-04
VIII.	**170**	2-09	XVI.	**128**	1-95
IX.	**146**	2-03	XVII.	**138**	2-00
en moyenne	**157**	**2-09**	en moyenne	**127**	**2-06**

Digitized by Google

Tableau *B*.

Dosage du mélange		Cube de béton de scorie d'ordures mis à l'épreuve le 5 mars 1909						Cube de béton de gravier mis à l'épreuve le 9 décembre 1909		
		Dosage du mélange								
ciment	scorie	scorie fine	scorie moyenne	N° du cube	Force de résistance en kg. par cm²	Force de résistance moyenne en kg. par cm²	Poids du volume	N° du cube	Force de résistance en kg. par cm²	Force de résistance moyenne en kg. par cm²
1	4	1	1	IV.	**189**	178	1-81	I.	**201**	189
				V.	**176**		1-81	II.	**156**	
				VI.	**170**		1-78	III.	**209**	
		1	2	X.	**173**	200	1-75	VI.	**126**	127
				XI.	**225**		1-79	V.	**133**	
				XII.	**202**		1-79	VII.	**122**	
1	6	1	1	I.	**86**	89	1-66			
				II.	**87**		1-61			
				III.	**94**		1-66			
		1	2	VII.	**119**	113	1-64			
				VIII.	**103**		1-59			
				IX.	**116**		1-64			

Des essais faits à Munich donnèrent une force de résistance moyenne de 159, 165 et 172 pour les cubes en béton de scorie.

Des expériences de Cologne eurent pour résultat qu'après 28 jours la résistance du ciment était:

avec de la scorie à gros grains . . . . de 36.5 %
„ „ „ „ „ grains fins . . . . . „ 35.3 %

plus haute que le même mélange avec ciment et sable.

***

Pour ce qui concerne *le lieu convenable pour la situation d'une usine d'incinération* des ordures, nous dirons qu'on peut la placer à volonté dans un faubourg, puisqu'un établissement d'incinération moderne comporte moins d'inconvénients que certaines fabriques. Voilà quelques exemples pouvant servir d'indications pour le choix de l'emplacement. A Londres plusieurs établis-

Digitized by Google

sements d'incinération se trouvent au centre de la ville. A Gloucester l'établissement d'incinération est situé juste à côté de la cathédrale. A Dublin, Glasgow, Brunn, Hambourg, Barmen, etc., les établissements sont placés dans le quartier des fabriques. A Bruxelles nous trouvons l'établissement dans un quartier populeux, dans le voisinage de la gare du Nord: à Frederiksberg, il est en relation avec un magnifique hôpital moderne.

C'est un fait indiscutable que les ordures fraîches ne produisent pas une odeur pénétrante, ainsi que le font certains matériaux en manipulation dans le quartier des fabriques, et dont l'odeur se fait sentir à certaines époques dans toute la ville. Les constructeurs d'établissements d'incinération modernes se sont proposés pour but de rendre imperceptible, même dans l'établissement, l'odeur inhérente aux ordures, et d'écarter ainsi les dernières objections qu'on pourrait faire contre le placement de ces établissements sur le territoire de la ville.

Comme nous le savons, c'est dans la salle des chaudières que l'incinération des ordures se fait, dans des fours hermétiquement fermés au dehors et chauffés à une température excessivement haute, de sorte qu'il ne reste pas un atome de matière organique qui ne soit anéanti. Les gaz chauds s'échappant par la cheminée sont également complètement inodores; ils ne contiennent pas plus d'ammoniaque que d'hydrogène sulfuré. On ne voit pas sortir de la cheminée une fumée noire, comme celle que bien des fabriques lancent impunément sur les villes, et on n'aperçoit au sommet de la cheminée qu'un petit nuage jaunâtre, qui provient de la condensation des gaz chauds arrivant à l'air froid, et qui n'est en vérité que de la vapeur d'eau.

Mais le choix de l'emplacement est important à cause des frais de transport des ordures qui en dépendent. Plus l'établissement d'incinération est près de la ville, plus il sera facile de résoudre la question de l'enlèvement des ordures le plus avantageux et le plus hygiénique. Bien souvent cette question est solutionnée en même temps que l'on décide de l'incinération des ordures. Alors on cherche aussi d'habitude à remplacer les voitures collectrices anciennes par un autre système de camionnage, suivant lequel les ordures sont placées déjà, lors de leur collecte, dans des récipients fermés, alignés par nombre de trois ou quatre sur une seule voiture. Une fois transportés à l'usine, ces récipients y sont descendus des voitures par un treuil quel-

Digitized by Google

conque, et sont directement transportés sur les orifices de chargement des fours. Ceci signifie en beaucoup de cas la dépréciation complète des vieilles voitures de transport, et d'autre part l'achat d'un nombre considérable de nouvelles voitures avec caisses collectrices.

Mais il est tout à fait inutile de compliquer dès le début l'incinération des ordures par le renversement complet de la collection des ordures, et de renchérir ainsi toute l'entreprise. Il y a des solutions moins coûteuses, suivant lesquelles les ordures sont charriées dans d'anciennes voitures à de nouveaux établissements d'incinération, et y sont versées dans un réservoir collecteur. De là, on les transfère ensuite en quantité voulue, par un arrangement mécanique, dans les fours d'incinération. Dans la question de la destruction des ordures, le plus important résultat à acquérir est assurément celui que la combustion des ordures ne se fasse que dans des fours dont la construction s'accommode aux circonstances locales, et spécialement à la valeur calorifique des ordures de la ville en question. Lors des délibérations sur le type convenable de four, on peut, si l'on veut, discuter en même temps un mode de chargement mécanique qui puisse s'adapter à toutes les variantes de la collection des ordures, sans toutefois l'établir dès le commencement. Une fois l'usine construite et mise en fonction, on peut plus tard s'occuper graduellement de transformer les voitures déjà existantes, et de les remplacer par d'autres nouvelles, sans compromettre par là l'utililité et le revenu éventuel de l'entreprise.

***

Malgré beaucoup d'hostilités l'incinération des ordures commence à prendre racine sur le continent; mais, somme toute, il y a encore des conseils municipaux, où le sentiment général s'est formé que l'incinération des ordures doit subir encore une certaine évolution, avant qu'on puisse s'y fier en toute sécurité. Mais les progrès sur ce terrain ne peuvent plus être entravés. En avançant par des voies différentes, les techniciens des diverses nations, profitant des résultats et impulsions mutuels, sont arrivés tout récemment à des résultats définitifs presque semblables.

Après cette victoire sur des hésitations incarnées, et après

Digitized by Google

tant d'essais, le développement de l'incinération des ordures pourra continuer sans hésitation. Les conseils municipaux pourront adopter sans crainte l'un ou l'autre des systèmes; car les lignes principales du développement futur sont posées désormais de façon, à rendre impossible une déviation hors de la seule bonne voie indiquée.

Il nous reste encore à ne pas laisser oublier que cette institution est en premier lieu une nécessité *d'intérêt public*, et que son adaptation à une entreprise industrielle n'est à considérer qu'en second lieu. A ce point de vue un conseil municipal ne peut sûrement plus rien objecter contre l'incinération des ordures.

Les usines d'incinération des ordures commencent à se répandre partout. Leur répartition actuelle selon les pays est la suivante:

Allemagne:

Hambourg
Kiel
Francfort s.-le-M.
Wiesbaden
Beuthen
Furth
Aix-la-Chapelle*)

Angleterre:

Accrington
Acton
Aldershot
Aston-Manor
Ayr
Bangor
Barrow-in-Furness
Bary
Basingstoke
Bath
Batley
Battersea
Beckenham
Bermondsey
Birkenhead
Birmingham
Blackburn
Blackpool
Bolton
Bootle
Bournemouth
Bradford
Brentford
Bridport
Brighton
Bristol
Bromley
Burnley
Burslem
Burton-on-Trent
Bury St. Edmunds
Buxton
Cambridge
Canterbury
Cheltenham
Chesterfield
Chiswick
Chorley
Clekheaton
Clydebank
Colne
Coventry
Croydon
Dartford
Darwen
Dewsbury
Dorking
Droylsden
Dublin
Dundee
Ealing
Eastbourne
East Ham
Eccles
Edinburgh
Elland
Exmouth
Falmouth
Farnworth
Felixstowe and Walton
Felling
Fleetwood
Folkestone
Fulham
Gainsborough
Glasgow
Gloucester
Gosport and Alverstoke
Grantham
Gravesend
Grays Thurrock

(*) En construction.

Digitized by Google

Greenock
Grimsby
Guilford
Hackney
Handsworth
Hanley
Hartlepool
Haslingden
Hastings
Hereford
Heston and Isleworth
Heywood
Holyhead
Hornsey
Huddersfield
Hyde
Ilford
Ilkley
Ipswich
Kettering
King's Norton and Northfield
Kingston-upon-Thames
Lancaster
Leamington Spa
Leicester
Leigh
Leyton
Liverpool
Liversedge
Llandudno
Longton
Loughborough
Lowestoft
Luton
Lytham
Manchester
Mansfield
Mexborough
Middleton
Nelson
Newcastle-upon-Tyne
New Hunstanton
Northampton
Norwich
Nottingham
Nuneaton
Oldham
Ormskirk
Ossett
Padiham
Paisley
Partick
Pembroke
Perth
Plymouth
Pontefract
Pontypridd
Poplar
Port Glasgow
Portsmouth
Preston
Radcliffe
Rawtenstall
Redditch
Rhondda
Rhyl
Rochdale
Rotterham
Royton
Rugby
St. Annes-on-Sea
St. Helens
St. Pancras
Salford
Salisbury
Sheerness
Sheffield
Shildon and East Thikley
Shipley
Shoreditch
Slough
Smethwick
Southampton
Southgate
Southport
Stalybridge
Stepney
Stockton-on-Tees
Stocke Newington
Stoke-upon-Trent
Stretford
Sudbury
Swansea
Swinton and Pendlebury
Taunton
Todmorden
Tredegar
Twickenham
Wallasey
Waltham Holy Cross
Walthamtow
Wandsworth
Warrington
Watford
Wellingborough
West-Bridgeford
West-Hartlepool
Weymouth
Wigan
Wimbledon
Windsor
Wolverhampton
Wolverton
Wood Green
Woolwich
Worthing
Wrexham
Yarmouth
Yeovil
York

Autriche:

Brunn
Trieste*

Belgique:

Bruxelles
Ixelles
St-Gilles

Danemark:

Frederiksberg

(*) En construction.

Digitized by Google

Espagne:

Gibraltar

France:

Paris: St-Ouen
" Issy
" Ivry
" Vitry
" Romainville
" Gennevilliers
Le Havre
Rouen

Hongrie:

Fiume
Miskolcz

Monaco:

Fonteville

Norvège:

Malmö *

Pays-Bas:

Rotterdam

Russie:

St-Pétersbourg
Varsovie
Tsarskoë-Selo

Suède:

Stockholm

Suisse:

Zurich

Canada:

West-Mount

États-Unis d'Amérique:

New-York
Seattle
Schenectady
Milwaukee
Buffalo
Montgomery
San Francisco

Amérique du Sud:

Buenos-Ayres
Para
Pernambuco
Rio-de-Janeiro

Égipte:

Le Caire
Alexandrie

Afrique de l'Est:

Mombasa
Zanzibar

Afrique de l'Ouest:

Zakandi

Afrique du Sud:

Bloemfontain
Durban
Lorenzo-Marques
Kalk-Bay
Johannesburg
Pretoria

Australie:

Adelaide
Perth
Melbourne (Prahran)
Sydney
Auckland
Annandale
Lithgow
Christchurch
Towomba

Strait-Settlements:

Singapore
Penang

(*) En construction.

Digitized by Google

NOTE

sur le problème de la pointe et le tirage méeanique

dans les Usines électriques.

LOUIS PRAT (Paris)

La consommation de combustible entre pour une très grande part dans le prix de revient de l'énergie électrique dans les centrales à vapeur. Aussi le choix de méthodes de chauffe rationnelles est-il un des points qui attire le plus l'attention des ingénieurs exploitants.

L'on est arrivé, dans les exploitations bien conduites, à réaliser aujourd'hui des rendements thermiques en marche courante compris entre 70 et 76 %, par le choix judicieux des foyers, des combustibles, des générateurs et des économiseurs. Le contrôle de la combustion, par des appareils de mesure enregistreurs de la dépression ou de la composition des gaz, permet d'assurer de *façon permanente* pour les régimes normaux de vaporisation un rendement aussi satisfaisant.

La question de contrôle de la chauffe semble donc résolue à l'heure actuelle.

Par contre, il est une autre question sur laquelle les avis sont très partagés et qui possède une influence considérable sur la consommation totale de combustible: c'est celle de la façon de passer les pointes avec les chaudières.

En présence d'une demande de vapeur fortement variable, tel que le cas se présente généralement dans les stations centrales électriques, est-il plus économique:

1° De conserver aux chaudières leur vaporisation normale, et d'ajouter au fur et à mesure des besoins de nouvelles chaudières gardées à feu couvert?

Digitized by Google

2° Ou bien de forcer la vaporisation des chaudières en service normal?

Dans les chaudières telles qu'elles sont établies, dès qu'on dépasse des allures de 80 à 85 Kgs. de charbon par M² de grille, le rendement tombe, ce qui résulte certainement du fait que les foyers et les sections de passage des gaz dans le générateur ne sont pas calculés pour dépasser ces taux de combustion. Il semblerait donc logique de ne pas dépasser ces allures de combustion favorables, et de faire face à la demande en ajoutant de la surface de grille au fur et à mesure des besoins.

Par malheur la marche à feu couvert consomme une grande quantité de charbon, qui outrepasse le gain, et il ne fait aucun doute pour nous que l'on doive chercher à satisfaire au service avec le *minimum* de chaudières en attente.

L'allumage des chaudières, suivant les besoins, est, de toutes les solutions, la plus onéreuse; d'autant plus onéreuse que le type de générateur est plus puissant. Pour mettre en pression par exemple un générateur type Babcock de 420 Mq. de surface de chauffe, qui est le prototype, en quelque sorte, des unités de production de vapeur dans les grandes centrales, on consomme de 1600 à 1900 Kgs. de combustible.

La marche à feu couvert, elle, consomme environ 30 à 35 Kgs. par heure à pression réduite; par exemple, pour faire face à une pointe de 3 heures on consommera, avec un générateur du type précédent, durant les 21 heures de marche à feu couvert:

19 heures à 33 Kgs. (pression vapeur réduite) soit:	627 Kgs.	de charbon
2 » à 66 Kgs. (pour rattraper la pression) soit	132 »	»
Au total	759 Kgs.	»

Cette solution est donc bien plus économique que celle qui consiste à allumer de nouvelles chaudières; elle est cependant encore plus coûteuse que le forçage des générateurs pour en accroître la vaporisation.

Les essais portés plus loin sur des générateurs du type dont nous nous occupons montrent une diminution du rendement thermique, en allure forcée, de 3 °/₀. A ce moment, la consommation horaire de charbon est de 1586 Kgs.; la perte de charbon par heure est donc de $1586 \times 0.03 = 47$ Kgs. soit, pour 3 heures, 140 Kgs. de combustible seulement, au lieu des 759 Kgs. qu'exige la marche à feux couverts.

Digitized by Google

La seconde solution, celle qui consiste à pousser la vaporisation, apparaît donc comme la plus économique; elle n'exclut pas l'autre, car, dans la plupart des cas, il est impossible de fournir la quantité de vapeur exigée à l'époque de la pointe avec le même nombre de chaudières en service normal. On a intérêt toutefois à forcer le plus possible les chaudières en service normal de façon à en conserver le moins possible en feu couvert.

Le problème devient donc celui-ci: dans quelles limites pratiques et économiques peut-on forcer un générateur de vapeur et par quels moyens?

La première considération est celle de la vaporisation par Mq. de chauffe qu'on peut atteindre en toute sécurité durant les quelques heures de la pointe.

Le plus grand nombre des centrales électriques emploie des générateurs multitubulaires à tubes d'eau, dont la vaporisation normale peut être considérée comme de 15 Kgs. par Mq. de surface de chauffe et par heure.

Avec les chaudières à tubes peu inclinés, nous jugeons prudent de ne pas dépasser 25 Kgs.; à cette allure les dégagements de vapeur deviennent insuffisants, et il en résulte une perturbation de la circulation avec formation de poches de vapeur capables de laisser rougir les tubes.

Avec les chaudières à tubes verticaux, où les renversements de circulation sont plus difficiles et le dégagement de vapeur plus libre, on peut atteindre en allure forçée 35 Kgs.

Ceci dit, quels sont les moyens les plus rationnels pour provoquer l'augmentation de vaporisation cherchée?

On a proposé, sous le nom d'accumulation thermique, d'emmagasiner, dans un réservoir spécial, généralement superposé à la chaudière, de l'eau d'alimentation portée par la vapeur vive à la température correspondant à sa pression; pendant la pointe on ferme l'alimentation ordinaire et l'on injecte cette eau à température élevée.

On bénéficie ainsi de la chaleur contenue dans le liquide, et, à égalité de calories fournies par le foyer, on vaporise donc davantage; en un mot, on pousse la vaporisation sans pousser les feux; on se trouve ainsi dans des conditions d'économie favorables.

Par malheur l'accroissement de vaporisation est très faible. L'eau d'alimentation fournie par les économiseurs est en général à 100°; s'il s'agit de vapeur à 15 Kgs. (soit une tempé-

Digitized by Google

rature de 200°) le gain de calories par Kg. d'eau emmagasinée est de 100 cal. environ et, comme la chaleur totale de la vapeur saturée à cette pression est de 667 cal., l'accroissement de vaporisation qui en résulte est seulement de:

$$\frac{100}{667} = 0.15$$

soit 15 %. Avec de la vapeur surchauffée, dont la chaleur totale est plus grande encore, l'accroissement serait plus faible.

Bref, la seule solution vraiment pratique est celle de l'augmentation du taux de combustion au moyen du tirage forcé. Comme les dépressions nécessaires croissent très rapidement, le tirage naturel doit être éliminé, car les hauteurs de cheminées nécessaires deviendraient rapidement inadmissibles. Il faut donc avoir recours au tirage mécanique.

Parmi les systèmes de tirage mécanique il importe de distinguer:

1° Le tirage forcé ou par insufflation;
2° Le tirage aspiré ou par aspiration;
3° Le tirage par éjecteur ou par induction.

Nous avons été les premiers à réaliser, il y a près de 20 ans, ce dernier mode d'aspiration, dont nous allons montrer les caractéristiques intéressantes:

Signalons accessoirement que c'est à tort que l'on donne quelquefois le nom de tirage induit au tirage aspiré. Le tirage par éjecteur est le seul qui fonctionne par induction, le ventilateur ne participant pas directement à l'aspiration.

Pour comparer clairement les qualités et les limitations respectives des différents systèmes de tirage, assimilons notre chaudière à une conduite de vent.

La pression dans cette conduite est variable suivant les points. Aux points où elle est égale à la pression atmosphérique, on a coutume de dire que l'on est à la pression " zéro „.

Dans les systèmes par insufflation sous grille, la pression zéro est à l'intérieur de la chaudière (fig. 1). La courbe A montre la pression au cendrier et la dépression au registre, pour une allure modérée; on voit qu'au foyer la pression est zéro: c'est le cas, par exemple, d'un tirage compensé.

Si l'on veut pousser l'allure, l'écoulement des gaz obéissant,

Digitized by Google

savons-nous, à la loi des carrés, les pressions vont croître considérablement: c'est ce qu'indique la courbe B. Or, la dépression fournie par la cheminée présente un *maximum* invariable, représenté par le point *i*.

Donc, si l'on veut débiter quand même la quantité de gaz avec cette dépression *i*, il faudra augmenter considérablement la pression au cendrier; c'est ce qu'indique la courbe C. Mais alors, la pression zéro se déplace de *n* en n^1, et le foyer n'est

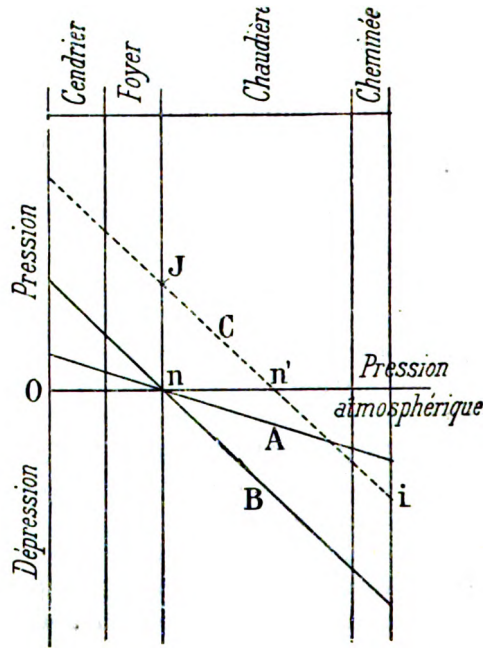


Fig. 1.

plus à zéro, mais bien sous la pression *j*. Il y a donc refoulement de fumée, et, si l'on ouvre le foyer sans arrêter le vent, retour de flamme.

Ainsi, que la pression dans le foyer soit plus ou moins variable autour du zéro (cas du tirage forcé ordinaire), ou qu'elle soit maintenue constamment égale à zéro par des artifices variés (cas des tirages compensés, proportionnés, etc.), on arrive au même dilemme: ou vaporisation insuffisante, ou retours de flamme et refoulements de fumée.

Les tirages par aspiration, avec lesquels la dépression à la

Digitized by Google

cheminée ne connaît pas de limite, sont seuls aptes à satisfaire, sans aucune limitation, à toute allure de combustion et de vaporisation, aussi poussée soit-elle.

Mais ici une distinction pratique fondamentale doit se faire entre le tirage aspiré ordinaire et notre tirage induit par éjecteur: c'est celle de la force motrice absorbée et de la dimension des appareils nécessaires.

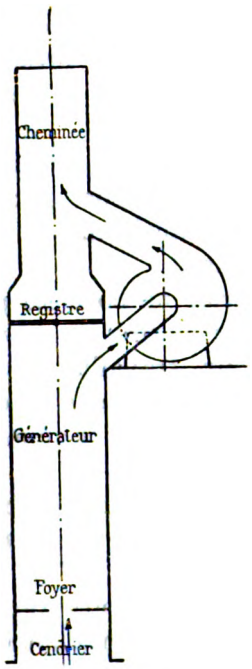


Fig. 2.

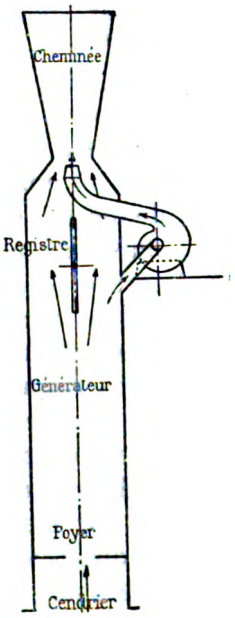


Fig. 3.

Dans le tirage aspiré direct (fig. 2) le registre doit être toujours fermé, sans quoi le ventilateur travaillerait en cour-circuit sans effet utile; il faut donc faire passer *la totalité des gaz* dans ce ventilateur, d'où encombrement énorme. Si, pour réduire le devis, on adopte un ventilateur plus restreint, ce que l'on est obligé de faire en pratique, on accroît considérablement les résistances. Non seulement on perd ainsi le bénéfice du tirage naturel, mais même on ajoute à la résistance totale du circuit, de telle sorte que, finalement, le travail du ventilateur se trouve très élevé, d'abord à cause de la résistance supplémentaire que

Digitized by Google

sa présence provoque, ensuite parce qu' il fonctionne sur un orifice beaucoup trop grand.

Dans notre système de tirage (fig. 3) la différence est fondamentale: le registre, qui n' a d' ailleurs plus raison d' être, est toujours ouvert. La cheminée franchement divergente et la dérivation créée par le ventilateur sont encore deux autres causes qui contribuent à diminuer la résistance totale du circuit, d'où il résulte le *maximum* d'utilisation du tirage naturel gratuit.

D' autre part, toujours en opposition avec le tirage aspiré direct, une *très faible fraction seulement* du volume de gaz total traverse le ventilateur, pour recevoir une pression vive adéquate, ce qui conduit tout naturellement à des ventilateurs de faible importance.

Cette pression vive est utilisée comme jet pulseur dans un éjecteur, pour créer le complément de dépression nécessaire à l'appel des gaz, d'où le nom de " transformateur de pression „ que nous avons donné à cet appareil.

En somme, la puissance à fournir ne consiste plus ici qu'en une simple accélération du tirage naturel, autovariable entre certaines limites; et le ventilateur, travaillant sur un orifice équivalant réduit, peut être choisi pour correspondre au rendement *maximum* sans risque d'aboutir à des appareils énormes, même pour les très grandes puissances.

Donc puissance extrêmement réduite, très faible encombrement et simplicité d'installation, telles sont les caractéristiques pratiques du tirage par induction.

Pratiquement, le dispositif général d'aspiration désigné sous le nom de cheminée Prat, comprend essentiellement (fig. 4 et 5) une cheminée en tôle assimilable à un éjecteur dont C est le convergent; A l'étranglement ou chambre, B le diffuseur. La dépression provoquant l' appel des gaz est créée par l'introduction, dans la chambre, d'un fluide pulseur fourni par le ventilateur et injecté par la buse D. En cas d'arrêt du ventilateur, la pulsion est produite par un éjecteur à vapeur S qui fait office de secours.

Le fluide pulseur peut être, indifféremment, soit de l' air froid emprunté à l'atmosphère, soit des gaz chauds empruntés aux carneaux.

Dans le premier cas, dit " hors-circuit „ (fig. 4), le ventilateur est complètement en dehors du circuit des gaz, et, par conséquent, dans les meilleures conditions de conservation possibles.

Digitized by Google

Toutefois l'addition d'air froid abaisse la température des gaz, et l'utilisation du tirage naturel se trouve diminuée dans la proportion du refroidissement.

C'est une installation de ce genre qui fonctionne à la Station Centrale de l'Exposition de Turin.

Cette installation comporte 2 cheminées Prat desservant: l'une, un groupe de 4 chaudières Tosi; l'autre, de 2 chaudières Babcock, correspondant ensemble à une puissance de 8000 chevaux environ.

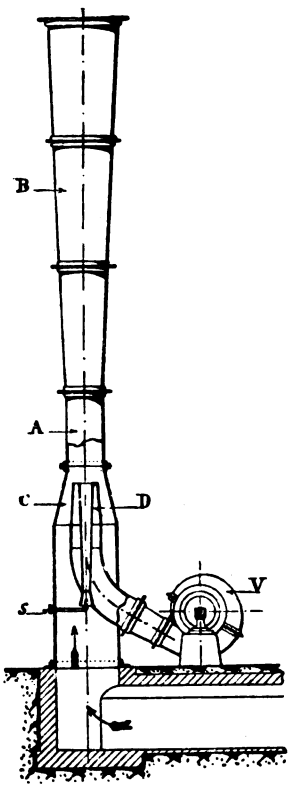


Fig. 4.

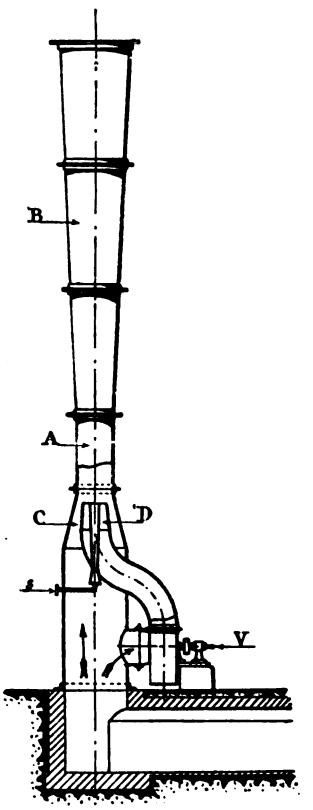


Fig. 5.

Dans le second cas, dit " en circuit „ (fig. 5), le ventilateur fonctionne dans les gaz chauds comme dans un tirage aspiré ordinaire; mais alors on supprime l'injection d'air froid et, par suite, la puissance nécessaire devient extrêmement minime. Aussi est-ce cette seconde solution qui est généralement adoptée dans les grandes centrales électriques.

Digitized by Google

Nous l'avons réalisée notamment à la Société d'électricité de Paris à son Usine de St-Denis, sur une chaufferie de 55.000 che-

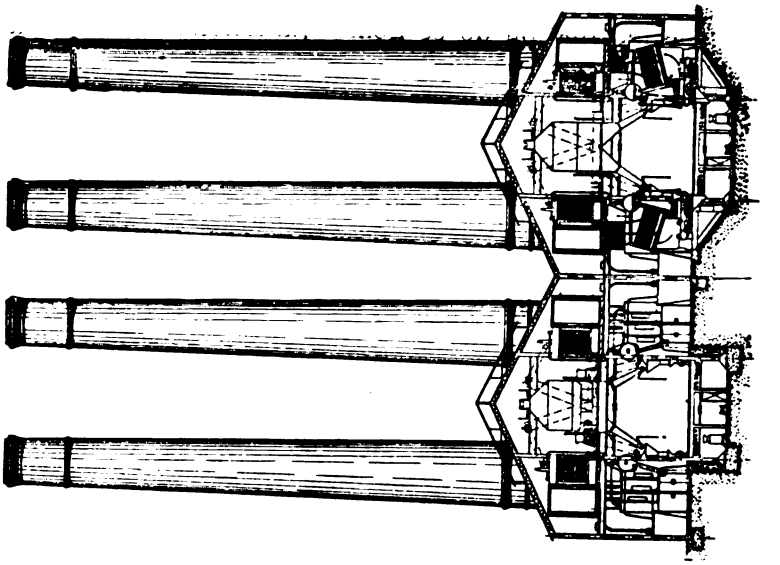


Fig. 7.

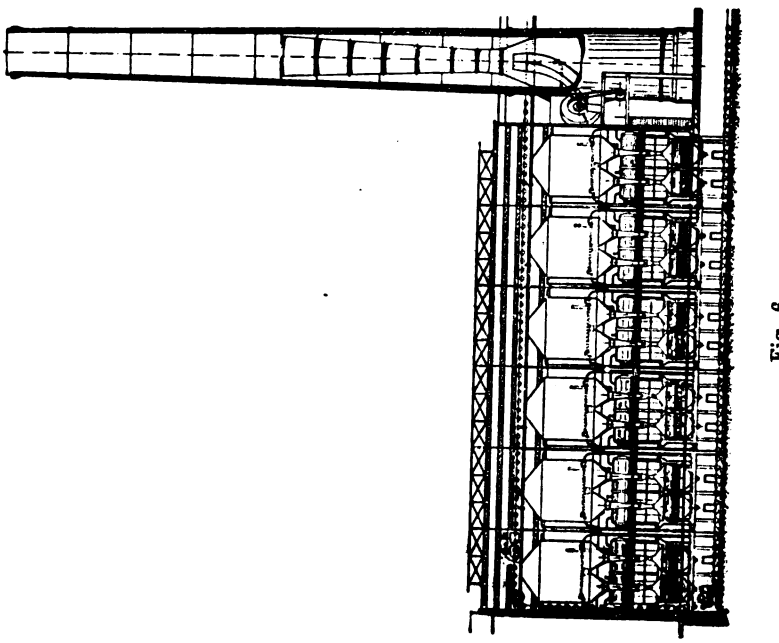


Fig. 6.

vaux, et elle a été adoptée également pour les Usines Nord et Sud de la Compagnie Parisienne de Distribution d'Électricité, actuellement en construction, pour une puissance de 180.000 chevaux.

Digitized by Google

La disposition générale de la chaufferie de Saint-Denis est portée sur les dessins ci-joints (fig. 6-7), l'éjecteur a été placé dans les cheminées qui existaient antérieurement, et les ventilateurs sur des plates-formes adjacentes.

Chaque cheminée correspond à une ligne de 6 chaudières Babcock, type marine, de 420 Mq. de surface de chauffe; le tirage naturel, dans les cas les plus favorables, fournit 18 à 20 $^{m}/_{m}$ de dépression au carneau et permet de produire 47.000 Kgs. de vapeur à l'heure; l'adjonction de l'éjecteur Prat permet, avec une dépression au carneau de 36 $^{m}/_{m}$, d'atteindre une vaporisation horaire de 67.000 Kgs. de vapeur, soit 26,5 kgs. de vapeur par Mq. de surface de chauffe, limite qu'il est prudent, avons-nous dit, de ne pas dépasser.

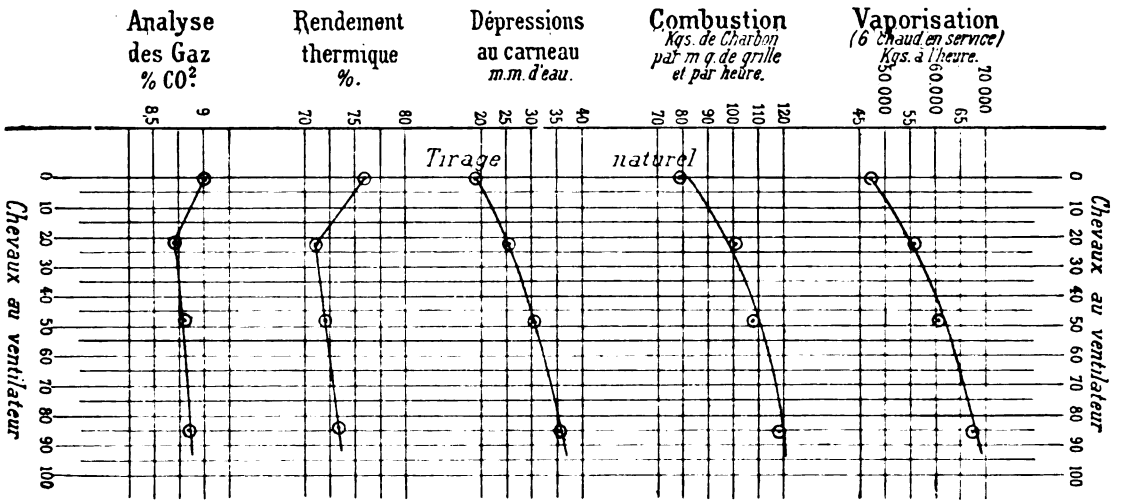


Fig. 8.

Les essais de réception, dont nous portons les résultats les plus intéressants sur le graphique ci-contre (fig. 8), montrent la très faible consommation de puissance que nous signalions plus haut comme une des caractéristiques intéressantes du systéme.

En comptant le cheval produit avec 6 kgs. de vapeur, ce qui est normal pour les grosses unités motrices employées dans les centrales, les 3 essais en allure forcée portés sur le graphique correspondent aux consommations suivantes:

Digitized by Google

Kgs. de vapeur produits	Chevaux absorbés	Kgs. de vapeur consommés	Consommation du ventilateur en %
67.200	85.5	513	0.76 %
60.500	47.9	288	0.48 %
55.900	22.2	134	0.25 %

Il est inutile de faire ressortir que ces consommations de vapeur sont beaucoup plus réduites que celles qu'on note avec les tirages par aspiration directe, lesquelles, dans la plupart des cas, atteignent 4 à 5 %, et même dépassent fréquemment ce chiffre.

On a reproché enfin au tirage par aspiration de provoquer des rentrées d'air, d'où diminution sensible du rendement thermique en allure forcée.

Il est évident qu'avec des maçonneries en très mauvais état ce facteur pourrait avoir une certaine importance. Mais, avec des massifs et des carneaux normalement entretenus, cet effet est insignifiant; nous signalons d'ailleurs, incidemment, que les stations modernes commencent à adopter les chaudières et les carneaux à armature métallique, donc parfaitement étanches; c'est le cas, par exemple, des nouvelles usines électriques en construction pour l'alimentation de l'agglomération parisienne, dont nous avons parlé un peu plus haut.

Il est facile de démontrer le fait en consultant le graphique des résultats d'essais de la Centrale Électrique de St-Denis; alors que le % CO^2, à la base de la cheminée, est de 9 % en allure réduite avec tirage naturel, il oscille entre 8,7 et 8,8 % à toutes les allures forcées; parallèlement, on constate que le rendement thermique n'est nullement affecté, et reste sensiblement constant aux allures forcées.

Ces chiffres de 8,7 à 9 % de CO^2 semblent indiquer des combustions à peine satisfaisantes. Nous devons faire remarquer qu'ils résultent des analyses de gaz prélevés au bas de la cheminée, après un parcours de 50 à 60 m. dans des carneaux complètement extérieurs au sol.

Ces pourcentages indiquent donc des rentrées d'air qui influent, dans une certaine mesure, sur le tirage naturel des cheminées; mais nullement sur le rendement thermique des chaudières, dans lesquelles on atteint couramment 14 % de CO^2, après la première circulation.

La critique des rentrées d'air, avec le tirage par aspiration,

Digitized by Google

doit donc être réduite à néant, car, s'il existe des rentrées d'air, elles se produisent, pour la plus grande part, dans les carneaux des chaudières et non dans les générateurs eux-mêmes, ce qui ne peut influencer défavorablement le rendement thermique de ceux-ci.

En résumé nous croyons avoir démontré dans cette note, qu'il est possible de réaliser aisément des allures de vaporisation forcées, sans diminution sensible du rendement thermique, et avec une consommation de vapeur inférieure à 1 % dans la majorité des cas.

La seule limitation, dans cette voie, est le régime que peuvent supporter les générateurs avec sécurité.

DISCUSSION

M. P. LECLER (Chatellerault-France) *indique que, en ce qui concerne les accumulateurs de chaleur, il est nécessaire de ne pas oublier de faire mention du nom de M. Rateau, qui a beaucoup fait pour ce genre d'applications.*

Il demande ensuite des explications complémentaires sur les dispositifs prévus pour les ventilateurs employés par M. Prat, seulement en ce qui concerne le refroidissement des paliers.

M. L. PRAT (Paris). *Jusqu'ici on avait employé dans les ventilateurs fonctionnant dans les gaz chauds des paliers à refroidissement d'eau. C'est là une sujétion souvent fort ennuyeuse; il faut une canalisation d'eau et une surveillance qui, si elle se relâche, peut occasionner des avaries.*

Dans le dispositif breveté par la Maison Prat, le refroidissement est obtenu par un grand courant d'air de balayage; la figure ci-contre montre un ventilateur Prat à une ouïe, spécial pour gaz chauds. En V

Digitized by Google

est annexée à la turbine spéciale une petite turbine auxiliaire aspirant l'air ambiant, qui décrit le cycle indiqué par les flèches.

La température de l'huile dans les paliers ne dépasse jamais, de plus de 20°, la température ambiante.

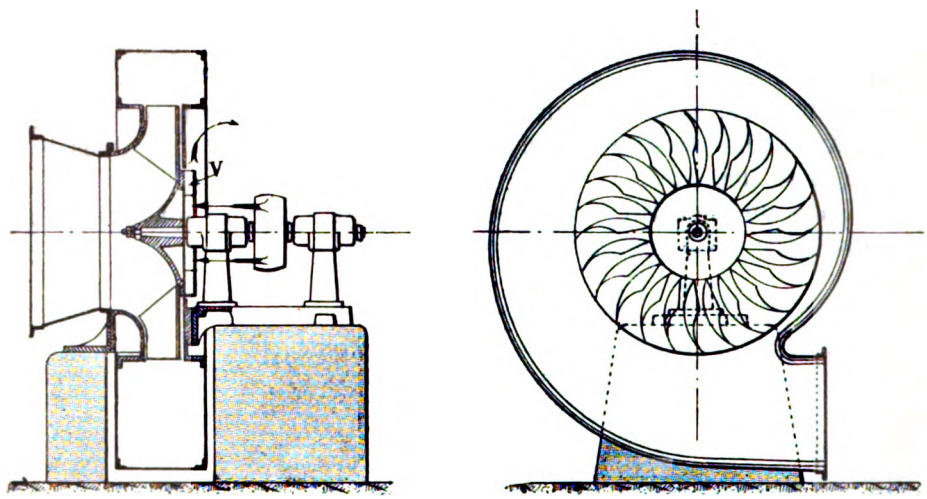


Fig. 9.

M. G. DEHENNE (Paris) *intervenant dans la discussion rétablit la distinction qu'il y a lieu de faire entre l'accumulateur thermique Rateau et l'accumulateur volumétrique Harlé & Cie.*

Digitized by Google

Aluminium für elektrische Leitungen.

E. Huber-Stockar (Zürich).

Einleitung.

1) *Frühere Congressberichte.*

Dem internationalen elektrotechnischen Kongress in St.-Louis 1904 wurde von H. W. Buck ein Bericht vorgelegt, betitelt: " The use of aluminium as an electrical conductor „. Jener Berichterstatter erklärt auf Grund einer Umfrage, *dass das Versuchsstadium der Fabrikation des Aluminiums vorbei sei und dass das Fabrikat, wie es jetzt geliefert werde, vollständig zuverlässig sei und den dafür gegebenen Garantien entspreche.*

Buck behandelt besonders einlässlich die Frage des Durchhanges bei grossen Spannweiten und die Frage des Winddruckes. Er schliesst seinen Bericht damit, dass er sagt, Aluminium werde, wenn sein Preis einmal sehr niedrig sei, wahrscheinlich das Hauptmetall für die Fortleitung des elektrischen Stromes sein.

Dem internationalen Congress für angewandte Elektrizität in Marseille 1908 wurde von E. Dusaugey ein Bericht vorgelegt, betitelt: " Rapport sur l'emploi de l'aluminium comme conducteur électrique „.

Er konstatiert die Zurückhaltung, welche in Frankreich in der Verwendung des Aluminiums als Leitungsmaterial beobachtet wurde. Er hätte diese Zurückhaltung mit Recht auf ganz Europa beziehen können. Er schliesst seinen Bericht mit dem Wunsche, es möchte derselbe am Congress oder in späteren Versammlungen zu einer für die Industrie fruchtbaren Diskussion führen.

Digitized by Google

2) *Rechtfertigung des Themas.*

Wenn dem internationalen Congress für angewandte Elektrizität in Turin 1911 wiederum ein Bericht über denselben Gegenstand vorgelegt wird, so geschieht dies, weil auch heute noch eine grosse Zurückhaltung in der Verwendung des Aluminiums für elektrische Leitungen beobachtet wird, eine Zurückhaltung, welche weder genügend gerechtfertigt werden kann, noch zu der Aufnahme passt, welche andere zum Teil gewagte Neuerungen auf elektrotechnischem Gebiet gefunden haben.

Aluminiumleitungen haben allerdings in den letzten Jahren an Verbreitung gewonnen, insbesondere in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, in Europa hauptsächlich in Frankreich. Allein man kann doch die Vorherrschaft des Kupfers noch kaum als bestritten bezeichnen.

Der vorliegende Bericht hat lediglich den Zweck, diese für die produzierende und konsumierende Industrie so wichtige Frage der Verwendung des Aluminiums für elektrische Leitungen wieder zur Diskussion zu bringen. Der langsame Fortschritt in der Verbreitung von Aluminiumleitungen ist zum Teil auf Vorurteile, Meinungen und unrichtige Nachrichten zurückzuführen. Eine nützliche Diskussion wird auf die einzelnen Einwände, und zwar sowohl auf wirklich bekannt gewordene, als auch auf über dieselben hinaus liegende denkbare andere, eintreten müssen. Im nachfolgenden wird versucht, die Begründetheit dieser Einwände zu beurteilen und dieselben, soweit sie nicht gänzlich widerlegt werden können, auf ein richtiges Mass zurückzuführen.

3) *Literatur.*

Die vorhergehenden Congressberichte haben den Gegenstand in mehr mathematischer Form so vollständig behandelt, dass im vorliegenden Berichte auf die mathematische Seite der Frage nur soweit eingetreten wird, als es unbedingt für das Verständnis und den Zusammenhang notwendig ist. Es muss auf beide früheren Congressberichte verwiesen werden. Eine sehr bemerkenswerte gedrängte, aber umfassende Arbeit ist von Herrn Elvio Soleri unter dem Titel: *L'uso dell'alluminio come conduttore della Elettricità,* " L'Elettricista „, 1909, Hefte 10 und 13, veröffentlicht worden, in welcher bereits Hochspannungskabel behandelt werden.

Digitized by Google

Ferner ist ein vortreffliches kleines Buch von H. M. Hobart "Bare Aluminium cables „ (The Electrical Times, 8 Bream's Building, Chancery Lane, London E. C.) dieses Jahr erschienen, in welchem für praktische Bedürfnisse eine rechnerische Vergleichung zwischen Aluminium und Kupfer für Leitungen ausserordentlich übersichtlich und vollständig durchgeführt ist.

Es ist ferner auf die Veröffentlichungen von Richard Apt, " Hochspannungskabel und Hochspannungsübertragungen „, E. T. Z. 1908, Heft 8 u. 9 und von W. von Möllendorff, " Metalle für Freileitungen „, E. T. Z. 1910, Heft 44, zu verweisen. Ebenso haben die grossen Aluminiumwerke wissenschaftlich gehaltene Veröffentlichungen herausgegeben, derart, dass der Gegenstand auch in Gestalt von Tabellen eine ausgiebige Darstellung gefunden hat. Unter den Beilagen zu diesem Bericht findet man übrigens eine Uebersicht über die lesenswerteste Literatur betreffend den vorliegenden Gegenstand. Man findet eben daselbst einige tabellarische Uebersichten über ausgeführte Aluminiumleitungen und über die physikalischen Konstanten der in Betracht kommenden Metalle.

Der vorliegende Bericht kann sich daher im Text auf eine Diskussion der verschiedenen, für die Beurteilung des Aluminiums und des Kupfers massgebenden, Punkte ohne grossen Aufwand von Zahlen beschränken.

4) *Aluminium für elektrische Maschinen und Apparate.*

Dem Titel des vorliegenden Berichtes entsprechend wird die Verwendung des Aluminiums für elektrische Leitungen, nicht allgemein für elektrische Leiter, behandelt werden. Für die Zwecke des Berichtes definieren wir die elektrische Leitung allgemein als ausserhalb von Maschinen, Transformatoren und Apparaten liegende einzelne oder vergesellschaftete elektrische Leiter von beträchtlicher Länge, oder, wenn von geringerer Länge, doch von beträchtlichem Querschnitt.

Dieser Bericht muss immerhin auf den möglichen Einwand kurz eintreten, welcher sich darauf stützt, dass die Einführung des Aluminiums im Bau elektrischer Maschinen und Apparate bemerkenswerte Erfolge nicht gezeitigt habe. Ein solcher Einwand ist nicht stichhaltig, weil die Verhältnisse für die Verwendung des gegenüber Kupfer spezifisch voluminöseren Aluminiums im Maschinen- und Apparatebau von vorneherein ungünstig

Digitized by Google

lagen und hauptsächlich infolge der Fortschritte im Bau elektrischer Maschinen immer ungünstiger wurden. Im Jahre 1899 war Aluminium mit Kupfer verglichen so billig, dass seine Verwendung für Spuhlen vorteilhaft erschien. Der Berichterstatter kann 12 Transformatoren von je 200 KW. Leistung (gebaut von der Maschinenfabrik Oerlikon 1899) mit Primärspuhlen (6800 Volt) aus Aluminiumdraht anführen, die nach frisch eingeholter Erkundigung noch heute im Betrieb stehen.

Der Fortschritt im Bau elektrischer Maschinen und Transformatoren ist aber durch die Anforderungen an den Nutzeffekt und an die Beständigkeit der Spannung an eine Richtung gebunden worden, welche u. a. die äusserste Drängung aller Abmessungen und hauptsächlich derjenigen der Leiter mitsichbringen musste und damit nicht nur das spezifisch voluminöse Aluminium in fast allen Fällen ausschloss, sondern vielmehr ein Bedürfnis nach einem spezifisch weniger voluminösem Leitermetall als das Kupfer entstehen liess. Das Aluminium könnte gar nicht billig genug werden, um die durch die grossen Leiterquerschnitte verursachten Mehrkosten der übrigen Teile der Konstruktion wett zu machen.

Bei elektrischen Leitungen hat eine Vergrösserung des Leiterquerschnittes im allgemeinen eine weit geringere Bedeutung, insbesondere bei nackten Leitungen.

Zwischen nackten Leitern von Leitungen befinden sich Luftzwischenräume, deren Vergrösserung nach Massgabe der dem Aluminium entsprechenden Leiterverdickung praktisch nichts kostet und nicht nachteilig ist; die Umstände bei Leitungen sind also radikal verschieden von denjenigen bei Maschinen und Apparaten und es wäre irrig, aus der sehr beschränkten Verwendbarkeit des Aluminiums im ersten Falle auf eine beschränkte Verwendbarkeit im zweiten Falle zu schliessen.

5) *Art der Behandlung des Themas.*

Die Hindernisse und Einwände, auf welche das Aluminium im Leitungsbau stösst, und die Vorteile, die es bietet, sind zum Teil unabhängig von der besonderen Art und dem besonderen Zweck der Leitungen, zum Teil beziehen sie sich auf Leitungen von bestimmter Art und bestimmtem Zweck. Es ergibt sich daraus neben einer Gruppe allgemeiner Diskussionspunkte eine andere Gruppe spezieller Punkte bezüglich Art und Zweck der

Digitized by Google

in Betracht kommenden Leitungen. Um in der Diskussion die Bezugnahme möglichst zu erleichtern, hat der Berichterstatter eine systematische Einteilung des Stoffes versucht und zwar bei der allgemeinen Gruppe nach der Natur der Einwände, bei der speziellen Gruppe nach der Art und dem Zweck der Leitungen. Irgend einen Anspruch auf innere technische Begründung erhebt diese Einteilung selbstverständlich nicht! Sie ist nichts anderes als eine auch anders gegliedert denkbare Uebersicht über die zur Diskussion gestellten einzelnen Fragen.

Dazu ist weiter zu bemerken, dass die Einteilung nur für Starkstromleitungen durchgeführt ist und dass die Schwachstromleitungen am Schlusse mehr summarisch behandelt werden, unter Hinweis auf alles das, was für Starkstromleitungen dargelegt wurde und ohne weiteres auch Giltigkeit für Schwachstromleitungen besitzt. Diese Behandlungsweise erscheint auch dadurch gerechtfertigt, dass dem Aluminium auf dem Gebiete der Schwachstromleitungen bei weitem nicht die Bedeutung zukommt, wie auf demjenigen der Starkstromleitungen.

***

Starkstromleitungen.

α) Leitungen aus Aluminium und Kupfer in einer und derselben Anlage.

1) *Coexistenz an sich.*

Auf den ersten Blick wenig wichtig, in Wirklichkeit aber sehr grundlegend, ist die Frage: Ergeben sich aus dem gleichzeitigen Vorhandensein an sich von Aluminium und Kupferleitungen in einem und demselben Leitungsnetz oder Betriebe Nachteile?

Diese Frage kann auch so ausgedrückt werden: Wie ist der Einwand zu beurteilen, welcher dahin lautet " Stört die Verwendung des Aluminiums die Einheitlichkeit eines Leitungsnetzes oder Betriebes, in welchem bereits Kupferleitungen vorhanden sind? „

Die Störung der Einheitlichkeit ist selbstverständlich zuzugeben. Es ist aber offenbar, dass sie weder in ästhetischer Beziehung

Digitized by Google

noch in Beziehung auf das Funktionieren der Anlage irgendwelche Nachteile haben kann, vorausgesetzt natürlich, dass die einzelnen Leitungen aus Aluminium richtig dimensioniert und montiert worden seien, eine Voraussetzung, die eben so sehr für die Kupferleitungen gemacht werden muss. Die Aluminiumleitungen werden vielmehr zufolge grösserer Kapazität in vielen Fällen den Betrieb in gewissem Sinne nicht unmerklich verbessern.

Was die Respektierung der Einheitlichkeit in elektrischen Anlagen anbetrifft, so lehrt der Einblick in sehr zahlreiche Maschinen-, Transformatoren- und andere Anlagen, dass man die Uneinheitlichkeit ohne Bedenken in den Kauf zu nehmen pflegt, wenn durch die Einführung neuer Systeme oder Bauarten irgendwelche Vorteile erreichbar erscheinen, welche man praktisch glaubt höher einschätzen zu dürfen als die Nachteile einer Uneinheitlichkeit, die doch bei maschinellen Einrichtungen notorisch sind.

Geht ein Betrieb zur Verwendung des Aluminiums für alle seine Leitungen über und verfährt er bei der Installation derselben in der dem Aluminium angepassten Weise, so können aus dem Bestehenbleiben der früher gebauten Kupferleitungen Nachteile ebenfalls unmöglich entstehen. Wenn man aber fortfährt, neben neuen Aluminiumleitungen durch dasselbe Personal auch neue Kupferleitungen erstellen zu lassen, so besteht die Gefahr, dass das Aluminium nach den bei Kupfer richtigen Regeln und mehr noch zulässigen Gewohnheiten behandelt wird. Diese gleiche Behandlung beider Metalle hat tatsächlich zu zahlreichen Misserfolgen in der ersten Zeit der Verwendung des Aluminiums zu Leitungen geführt. Bei der Anlage und Montage der Leitung muss die Eigenart des Aluminiums berücksichtigt und dementsprechend anders als bei Kupferleitungen verfahren werden. Die Behandlung des Aluminiums ist weder schwieriger noch kostspieliger. In verschiedenen Punkten würde sie sogar mit Vorteil auch auf das Kupfer angewendet. In der Gefahr, dass dem Aluminium nicht die richtige Behandlung zu Teil werde, kann man, wenn man will, einen Nachteil der Uneinheitlichkeit in einer Anlage und einem Betriebe erblicken, der durch die Verwendung beider Metalle zu Leitungszwecken bedingt wird. Dieser Nachteil haftet aber nicht dem Aluminium an sich an, sondern tritt nur in die Erscheinung, wenn es an Vorbereitung und Aufsicht bei der Erstellung der Aluminiumleitungen fehlt. Es kann daraus kein Grund dafür abgeleitet

Digitized by Google

werden, von der Verwendung des Aluminiums abzusehen, wenn es sonst Vorteile bietet oder verspricht.

Man könnte gegen die Verwendung von Aluminium und Kupfer in demselben Betriebe weiter einwenden, es seien grössere Vorräte an Leitungsmaterial notwendig, als bei der Beschränkung auf ein einziges Metall. Dieser Einwand verliert jedes grössere Gewicht, wenn man bedenkt, dass es sich in den einzelnen Betrieben sowie so niemals um grössere Vorräte an Leitungsmaterial handeln kann. Entweder ist der Bedarf an bestimmten Querschnitten für neue Leitungen zum voraus so genau und leicht bestimmbar, dass nur kleine Reste übrig bleiben, oder man adoptiert einige wenige Querschnitte für die verschiedenen Teile des Leitungsnetzes.

Jedenfalls können die ökonomischen Nachteile eines möglicherweise etwas vergrösserten Vorrates nur ganz verschwindend sein gegenüber den ökonomischen Vorteilen, welche das Aluminium bietet oder verspricht.

2) *Verbindungen zwischen Aluminium und Kupfer.*

Gegen die Verwendung des Aluminiums neben dem Kupfer ist schon eingewendet worden, die Verbindungen zwischen diesen beiden Metallen seien nicht einwandfrei ausführbar, insbesondere unterliege das Aluminium rascher Zerstörung im Kontakte mit Kupfer, auch sei eine befriedigende Verlötung des Aluminiums mit Kupfer, wie des Aluminiums überhaupt, nicht bekannt. Die Frage der Lötung des Aluminiums überhaupt wird später behandelt werden. Zur Zeit ist ein befriedigendes Verlötungsverfahren für die Zwecke des Freileitungsbaues nicht empfohlen, gleichviel, ob es sich um zwei verschiedene, oder nur um ein Metall handelt.

Der Anschluss an oder von Aluminiumleitungen muss mittels mechanischer Klemmkontaktmittel bewerkstelligt werden, die konstruktiv wesentlich mit denen überstimmen, mittels welcher man Leitungen von Aluminium unter sich verbindet und welche später besprochen werden. Wegen der grossen Entfernung zwischen Aluminium und Kupfer in der galvanischen Spannungsreihe muss gründlich dafür gesorgt werden, dass Feuchtigkeit zwischen einander nahe liegende Teile aus verschiedenem Metall nicht gelangen kann. Die Kontakte müssen daher nicht

Digitized by Google

nur mit kräftigen mechanischen Mitteln bewirkt und gesichert werden, sondern müssen durch einen der bekannten Aspaltanstriche, mit oder ohne vorherige Einhüllung mittels Isolierbandes, vor eindringender Nässe geschützt werden. So hergestellte Verbindungen sind erfahrungsgemäss dauerhaft und es frägt sich, ob nicht in der Vermeidung jeder Lötung unter Beschränkung auf mechanische Mittel ein Fortschritt im Leitungsbau überhaupt zu erblicken sei. Im Uebrigen wird im Zusammenhang mit Kabeln aus Aluminium ein Verfahren der Verlötung von Aluminium und Kupfer mitgteilt werden, welches sich praktisch bewährt hat (F. C. Raphael und J. B. Sparks, " Aluminium versus copper for low tension feeders and distributions in under ground networks „, Electrical Engineering, Nov. 24th, 1910 and Feb. 9th 1911).

β) Starkstromleitungen ueberhaupt.

1) *Grundlage des Interesses.*

Das Interesse an der Verwendung des Aluminiums für Leitungen findet seine Begründung darin, dass ein Leiter aus Aluminium von gegebener Länge und Leitfähigkeit von dem Momente an billiger ist als ein Leiter aus Kupfer von derselben Länge und Leitfähigkeit, in welchem der Preis des Aluminiums ein gewisses bestimmtes Vielfaches des Preises des Kupfers unterschreitet.

Dazu kommt, dass der Aluminiumleiter vermöge seines Verhältnisses zwischen spezifischem Gewicht und Bruchfestigkeit vor Bruch sicherer ist als der gleichlange und gleichgutleitende Kupferleiter. Endlich kommt hinzu, dass die Vergrösserung des Querschnittes die Bedingungen der Fortleitung in gewissen Hinsichten überhaupt verbessert.

Ende 1910 durfte nach W. von Möllendorff Aluminiumdraht auf gleiche Leitfähigkeit bezogen 1,92, auf gleiche Leitererwärmung bezogen sogar 2,2 Mal soviel kosten als Hartkupferdraht. Im übrigen wird auf die tabellarische Uebersicht der physikalischen Eigenschaften von Aluminium und Kupfer am Ende des Berichtes verwiesen. 1910 war das Verhältnis des Preises von Aluminium franko Verbrauchsstelle zum Preise von Lake-Copper loco New-York ca. 1,11 d. h. so niedrig, dass, wenn man die Kosten der Formgebung berücksichtigt, die bei Alu-

Digitized by Google

minium etwa dreimal so gross sind als bei Kupfer, die durch die Verwendung von Aluminium erzielbare Ersparnis gegenüber Kupfer auf gleiche Leitfähigkeit bezogen von der Grössenordnung von etwa 30 % gewesen ist.

Es ist evident, dass verschiedene, eine solche Ersparnis beschränkende, Momente hinzukommen dürften, bis es nicht mehr lohnend wäre, Aluminium anzuwenden oder doch wenigstens bei grösseren Leitungsbauten ganz regelmässig in Betracht zu ziehen. Ueber das Verhältnis des Kupfer- und Aluminiumpreises seit 1895 gibt eine spätere Tabelle Aufschluss.

Wenn man bedenkt, dass weit kleinere Ersparnisse als diejenigen, welche durch die Verwendung von Aluminium an Stelle des Kupfers für Leitungen erzielbar erscheinen, bei der Wahl von Maschinen und Apparaten und überhaupt bei der Vergebung von Lieferungen für elektrische Anlagen massgebend sind, so muss es verwundern, dass das Aluminium nicht eine viel ausgiebigere Verwendung im Leitungsbau bis jetzt gefunden hat, als es der Fall ist, wobei die bereits erstellten Aluminiumleitungen keineswegs etwa als unbedeutend hingestellt sein sollen sondern nur als relativ sehr wenig zahlreich und ausgedehnt im Vergleich zur Gesamtheit der in derselben Zeit erstellten Kupferleitungen.

2) *Gewohnheit.*

Ein beträchtliches Hindernis für die raschere Einführung des Aluminiums ist in der Angewöhnung an das Kupfer zu erblicken. Der Sprachgebrauch, der das Wort Kupfer ganz gewöhnlich mit den Worten Draht, Schiene, Leiter verbindet, führt dazu, dass in Anfragen, Spezifikationen und Bestellungen die Verwendung des Aluminiums oft formell ausgeschlossen oder erschwert ist.

3) *Bevorzugung des Kupfers als Metallbesitz; Altmetallwert.*

Wird dem Besteller der Aluminiumleiter als der billigere empfohlen, so schenkt er dem oft kein Gehör. Er erblickt im Kupferleiter einen Metallwert, der im hohen Grade kurrant und daher event. Wirklich ohne zu grosse Einbusse liquidierbar ist. Im Aluminiumleiter erblickt er einen ähnlich gearteten Metallwert nicht. Bei Maschinen und Apparaten denkt der Käufer

Digitized by Google

nicht an den Metallwert, auch nicht an den Altmaterialwert, der ja ungleich viel niedriger im Verhältnis zum Kaufpreis des neuen Objektes ist als der Metallwert und Altmaterialwert eines Aluminiumleiters im Verhältnis zu seinem Kaufpreis. Es besteht die Gewohnheit, bei einem Leiter an den Metallbesitz zu denken und ihn nicht als funktionellen Teil einer Anlage einzuschätzen, ähnlich wie eine Maschine oder einen Apparat. Diese metallistische Abneigung gegen das Aluminium kann wohl nur durch das Beispiel der Fälle von tatsächlicher Verwendung allmälig überwunden werden.

Diese Abneigung beruht auf untechnischen Erwägungen und kann durch technische Argumente nicht beseitigt werden. Nur die Erwägung, welche den Altmaterialwert betrifft, hat eine gewisse, aber sehr oft überschätzte, Begründetheit.

Es ist richtig, dass die Veräusserung alten Aluminiums nicht mit derselben Leichtigkeit von statten geht, wie diejenige alten Kupfers, einfach deshalb, weil für Aluminium nicht eine derartig verbreitete und vielseitige Verwendung wie für Kupfer besteht. Es muss aber dem entgegengehalten werden, dass bei der Neuanlage von Leitungen die den Abbruch betreffenden Erwägungen eine sehr untergeordnete Rolle spielen müssen gegenüber den Erwägungen, welche die billigste Erstellung und den vorteilhaftesten Betrieb betreffen. Es wäre nicht zu verstehen, weshalb man auf eine erhebliche Ersparnis bei der Erstellung einer Leitung verzichten sollte, weil man event. beim Abbruch derselben eine grössere Einbusse erleidet. Die Ersparnisse beim Bau gestatten sehr wohl, das allenfalls bestehende Risiko einer grösseren Einbusse an Metallwert beim Abbruch zu übernehmen.

4) *Preisschwankungen.*

Der Preis des Altmetalles macht selbstverständlich die Schwankungen des Preises des Neumetalles mit. Es kostete seit 1901 Aluminium in Barren loco Verbrauchsort im Minimum Frs. 1,55 per Kg., im Maximum Frs. 3,45, für Leitungszwecke aber nie mehr als Frs. 2,50, Lake-Copper loco New-York im Minimum Frs. 1,35, im Maximum Frs. 2,35, so dass die absolute Schwankung des Aluminiumpreises noch etwas kleiner als diejenige des Kupfers war. Es kann somit in dieser Beziehung das Aluminium nicht ein grösseres Risikob ergen als das Kupfer.

Digitized by Google

5) *Verantwortlichkeit.*

Ein Hindernis liegt in der Furcht der Leiter von Elektrizitätswerken vor der mit der Abweichung von einem so bewährten und gewohnten Material, wie das Kupfer, verknüpften Verantwortlichkeit namentlich im Falle von Freileitungen, d. h. von Anlageteilen, die Zufälligkeiten besonders ausgesetzt sind und nicht unter beständiger Aufsicht stehen, weder bei der Erstellung noch im Betrieb.

Dem ist entgegenzuhalten, dass heute aus den bestehenden zum Teil ausserordentlich bedeutenden Anlagen abgeleitet werden muss, dass diese Verantwortlichkeit keine schwerwiegende sein kann, dass sie vielmehr im Hinblick auf die möglichen Ersparnisse übernommen werden darf und sogar muss.

6) *Garantien.*

Die Kupfer- und Kabelwerke geben für Leitungskupfer keine Garantien, die sich auf das Verhalten des Materials bei der Montage am Gestänge und im Betriebe beziehen. Es werden solche Garantien auch nicht verlangt, weil man auf Grund der Erfahrung und aus Gewohnheit ein ausreichendes Vertrauen in alles Leitungsmaterial hat, welches Kupfer heisst. Beim Aluminium beziehen sich aber die technischen Bedenken gerade auf sein Verhalten bei der Montage und am Gestänge, wofür der Verkäufer des Aluminiums nicht garantieren kann, da jenes Verhalten wesentlich von der Wahl des Querschnittes und von der Behandlung bei der Montage, also nicht von ihm, abhängt.

7) *Vorgehen der Aluminiumproduzenten.*

Die amerikanischen Aluminiumproduzenten haben frühzeitig diese Sachlage erkannt und die französischen sind ihnen dann später gefolgt. Nachdem mehrere Leitungen in Amerika ausgeführt worden waren, bei deren Bau Aluminium einfach wie Kupfer behandelt wurde und welche dann unbefriedigende Ergebnisse zeitigten, unternahmen die amerikanischen Aluminiumproduzenten selbst die vollständige Montierung der Leiter am Gestänge, studierten das Verhalten des Materials systematisch

Digitized by Google

und stellten die Regeln der Behandlung auf Grund eigener praktischer Erfahrungen fest. Nach diesen Regeln wurden dann auch ganz grossartige Leitungsanlagen ausgeführt, die sich unbedingt bewährt und das Aluminium als Material für Freileitungen definitiv legitimiert haben. So entstanden richtig ausgeführte Aluminiumleitungen, für welche praktisch vollwertige Garantien vom Ersteller gegeben wurden. Dieses Verfahren dürfte auch in andern Ländern das erfolgreichste und sicherste sein. Es werden so Ausführungen vermieden, die fehlerhaft oder aus besonderen Gründen überhaupt keine Anwendungsfälle für Aluminium sind. Es wird sich so sowohl das Vertrauen in das Aluminium mehren, als auch die Kenntnis der richtigen Behandlung verbreiten, so dass nach einiger Zeit die direkte Mitwirkung der Aluminiumproduzenten entbehrlich wird.

8) *Unternehmer.*

Der am Vertrieb von Aluminium nicht interessierte Leitungsbauunternehmer hat kein Interesse an der Propaganda für das Aluminium und er kann sein Geschäft durch die Verwendung von Aluminium solange weder erleichtern noch verbessern, als er seinem Besteller die ganze erzielbare Ersparnis gegenüber Kupfer zugute kommen lassen muss. Dies wird der Fall sein, solange der Käufer sich gegen das vermeintliche grössere Risiko einer Aluminiumleitung durch die Realisierung einer möglichst grossen Ersparnis beim Bau selbst decken will.

Wenn der Besteller das Aluminium als vollwertigen Leiter einmal anerkennt, wird der Unternehmer an einer Aluminiumleitung mehr verdienen können als an einer Kupferleitung, weil die Aluminiumleitung einen im Verhältnis zu den Erstellungskosten höheren wirtschaftlichen Produktivwert hat als eine Kupferleitung, immer natürlich einen Fall vorausgesetzt, in welchem die Anwendung des Aluminiums gerechtfertigt war und richtig durchgeführt wurde.

9) *Nationale Rücksichten.*

Aus den bisherigen Betrachtungen ergeben sich keine stichhaltigen Gründe dafür, von der Verwendung des Aluminiums für Leitungen abzusehen, wenn es sonst Vorteile gegenüber Kupfer verspricht. Diese Vorteile müssen heute noch ziemlich

Digitized by Google

grosse sein, namentlich finanzielle, weil sonst im allgemeinen ein anderer ausreichender Stimulus nicht vorhanden ist. Mit der Zeit, wenn die Bekanntschaft mit dem Aluminium und das Vertrauen in dasselbe allgemein geworden sein werden, werden bei Leitungen ebenso wie heute schon bei Maschinen, Eisenkonstruktionen und Bauobjekten aller Art, bei denen es auch sehr auf Qualität und Dauerhaftigkeit ankommt, Ersparnisse von wenigen Prozenten die Wahl zwischen den beiden Metallen für Leitungszwecke entscheiden. Es werden dann auch nationale oder geschäftspolitische Momente die Wahl beienflussen. In Ländern, die Kupfer nicht selbst produzieren, wird die Verwendung des Aluminiums als eine Förderung der einheimischen Industrie angesehen und praktiziert werden.

10) *Preise.*

Der Preis wird immerhin im allgemeinen, *ceteris paribus*, der massgebenste Faktor sein. Es erscheint aber nicht tunlich, in diesem Berichte über Preise für einzelne Fälle massgebende Feststellungen zu machen. Einmal schwanken die Preise des Metalles, sodann bestehen für die Preise der Formgebung keine allgemein gültigen Normen. Es muss in jedem wichtigeren Falle auf die im übrigen leicht durchzuführende Vergleichsrechnung auf Grund derjenigen Preise abgestellt werden, welche verbindlichen Offerten auf die in Vergleich zu ziehenden Leitungsmaterialien entnommen werden können. Es kann daher hier nur an Hand der Gestaltung der Preise im Laufe der Zeit nachgewiesen werden, dass sich das Preisverhältnis immer günstiger für das Aluminium gestaltet und unverkennbar stabilisiert hat. Verzeichnet man für jedes Jahr mittlere Repräsentativpreise des Aluminiums und des Kupfers, so erhält man die Uebersicht auf Seite 506.

Hiezu ist zu bemerken, dass die zu einem Syndikat vereinigt gewesenen Aluminiumproduzenten für Aluminium zu Leitungszwecken von 1902 bis und mit 1907 einen Vorzugspreis von ca. Frs. 2,50 notiert haben und dass es nahe liegt, eine ähnliche Preistaktik auch in der Zukunft als sehr begründet und wahrscheinlich vorauszusehen.

Aus der folgenden Uebersicht ersieht man, dass die Verwendung des Aluminiums in jüngerer Zeit Ersparnisse gegenüber Kupfer ermöglicht, wie sie sonst selten durch eine technische Neuerung herbeigeführt werden.

Digitized by Google

Jahr	Aluminium in Barren franko Verbrauchsstation per Kg.	Speziell für Leitungszwecke	Lake-copper in New York per Kg.	Verhältnis Al : Cu	Speziell für Leitungszwecke
1895	Frs. 3,67		Frs. 1,23	2,98	
96	„ 3,37		„ 1,26	2,67	
97	„ 3,37		„ 1,29	2,61	
98	„ 3,09		„ 1,37	2,25	
99	„ 2,59		„ 2,02	1,28	
1900	„ 2,68		„ 1,88	1,42	
01	„ 2,60		„ 1,88	1,37	
02	„ 2,78	ca. 2,50	„ 1,35	2,06	1,85
03	„ 2,83	„	„ 1,54	1,85	1,62
04	„ 2,85	„	„ 1,48	1,93	1,69
05	„ 2,95	„	„ 1,79	1,65	1,40
06	„ 3,93	„	„ 2,23	1,54	1,12
07	„ 3,40	„	„ 2,35	1,45	1,06
08	„ 2,05		„ 1,52	1,35	
09	„ 1,55		„ 1,48	1,05	
1910	„ 1,62		„ 1,00	1,11	
Parität, auf gleiche Leitfähigkeit bezogen . . .	„ 1,90-2,00		„ 1,46	1,90 - 2,00	

11) *Esparnis bei gleicher Leitfähigkeit.*

Eine orientierende Vergleichung des Preises von Leitern gleicher Leitfähigkeit kann nachfolgenden Gegenüberstellungen entnommen werden.

Drähte von 6-9 mm. Durchmesser:

		Aluminium	Kupfer
Rohmetall (1910) . .	per kg.	Frs. 1,62	Frs. 1,46
Drahtziehen	„ „	ca. „ 0,36	ca. „ 0,12
Draht	„ „ „ „	1,98	„ „ 1,58

Verhältnis	ca. 1,26 : 1,00
Parität, auf gleiche Leitfähigkeit bezogen .	1,90 bis 2,00 : 1,00
Ersparnis	33,5 - 37,0 %

Digitized by Google

Seile von 150-200 mm² Querschnitt:

		Aluminium	Kupfer
Rohmetall (1910) . .	per kg.	Frs. 1,62	Frs. 1,46
Drahtziehen	„ „	ca. „ 0,40	ca. „ 0,13
Seilen	„ „	„ „ 0,22	„ „ 0,07
Seil	„ „	„ „ 2,24	„ „ 1,66
Verhältnis		ca. 1,35 : 1,00	
Parität, auf gleiche Leitfähigkeit bezogen .		1,90 bis 2,00 : 1,00	
Ersparnis		29,0 - 32,5 %	

A) Nackte Leitungen.

1) *Behandlung des Themas.*

Für die Zwecke des vorliegenden Berichtes werden die Merkmale der Nacktheit und der Isolierung der Leiter als Hauptmerkmale angesehen, obwohl die mechanische Anordnung der Leiter zu Leitungen in Ansehung wichtiger Eigenschaften der zu vergleichenden Metalle technisch besser begründet erscheinen kann. Das äusserliche Merkmal der Nacktheit ist aber der ganzen Gruppe von Leitungen eigen, auf welche die ausgiebigste Verwendung des Aluminiums bis jetzt stattgefunden hat und wohl auch in Zukunft stattfinden wird. Bei diesen Leitungen treten die wichtigen und entscheidenden mechanischen Erwägungen durchaus in den Vordergrund, solche betreffend die Bedeckung der Leitung mit Isolierungen kommen gar nicht in Betracht.

Unter dem Titel der nackten Leitungen können die die Oberfläche der Leiter speziell angehenden Fragen behandelt werden, obwohl sie nicht bei allen nackten Leitungen eine gleich grosse Bedeutung haben.

2) *Korrosion.*

Einer der frühesten Einwände gegen Leitungen, insbesondere Freileitungen, aus Aluminium wies auf eine Zerstörbarkeit des Aluminiums durch andauernde Feuchtigkeit und gewisse Dämpfe spezieller chemischer Beschaffenheit hin. Es wurde insbesondere

Digitized by Google

auch behauptet, Aluminiumfreileitungen könnten in der Nähe von Seeküsten nicht bestehen.

Der Abschluss gegen Feuchtigkeit ist bei Kontaktverbindungen bereits als notwendig bezeichnet worden, da die Korrosion des Aluminiums im Kontakt mit Kupfer bei Gegenwart von Feuchtigkeit infolge galvanischer Aktion beträchtlich ist. Jene Einwendungen bezogen sich aber nicht auf die Zerstörung von Verbindungen, sondern allgemein auf die im Freien hängenden Leiter.

Langjährige Erfahrungen deuten auf eine grössere Angreifbarkeit der Aluminiumleitungen im Vergleich zu Kupferleitungen nicht hin. Aluminium wird von Meerwasser weniger angegriffen als Kupfer; eine Aluminiumplatte von 100 cm² Oberfläche und 24,5758 gr. Gewicht im Flächenkontakt mit einer Eisenplatte hatte nach einer Eintauchung während 200 Stunden 0,009 gr. oder 0,04 % an Gewicht verloren gegen 0,054 gr. der Eisenplatte. Eine Aluminiumplatte gleicher Grösse und 24,8210 gr. Gewicht allein in Meerwasser von 80-90° C Temperatur hatte nach 18 Stunden 0,0035 gr. oder 0,014 % an Gewicht verloren.

Schwefelwasserstoff, welcher Kupfer schwarz färbt, entfärbt die Oberfläche des Aluminiums nicht. Verdünnte Schwefelsäure wirkt nur sehr langsam auf Aluminium und verdünnte Salpetersäure hat keine Wirkung auf reines Aluminium. Ammoniakgas greift Aluminium nicht an. Kalte organische Säuren haben nur ganz schwache Wirkungen auf Aluminium.

Eine Aluminiumplatte von 100 cm² Oberfläche und 24,7260 gr. Gewicht zeigte einen Verlust von 0,047 gr. oder 0,29 % des Gewichtes nach einer Siedung während 14 Tagen in einer Mischung von kaltem Essig mit Citronensäure bei Gegenwart von Kochsalz. Ein gleiches Stück Eisen, demselben Verfahren unterworfen, verlor 0,9 gr. und Zinn-, Silber- und Kupferplatten wurden beträchtlich angegriffen (Versuche veröffentlicht von der British Aluminium Co. Ltd., Notes on Aluminium and its alloys, Novembre 1899). Auf mit Meerwasser angefeuchtetes Holz gelegt, zeigte ein Aluminiumstreifen nach 6 Monaten eine Korrosion (Materialabtrag) von 0,127 mm., während ein gleicher Kupferstreifen eine ungefähr doppelt so grosse Korrosion zeigte.

Aus diesen Angaben, die selbstverständlich Erfahrungen mit eigentlichen Leitungen unter speziellen Verhältnissen weder widerlegen noch ersetzen können, folgt, dass Aluminium für Leitungszwecke eine ausreichende und dem Kupfer jedenfalls

Digitized by Google

im allgemeinen nicht nachstehende chemische Beständigkeit besitzt.

3) *Oxydation.*

Eine Eigentümlichkeit des blanken Aluminiums ist die ausserordentlich widerstandsfähige und elektrisch stark isolierende Oxydhaut, welche es in kurzer Zeit an der gewöhnlichen Luft annimmt und welche vor tiefer eindringender Oxydation wirksam schützt. Sie ist aber auch schuld an der Schwierigkeit der Lötung und an dem grossen Flächendruck und den grossen Kontaktflächen, welche man bei Verbindungen und Abzweigungen anwenden muss, damit der elektrische Strom genügend kleine Uebergangswiderstände vorfindet.

4) *Lötungen.*

Eine eigentliche Lötung des Aluminiums ist bis jetzt nicht völlig befriedigend gelungen; bei den Kabelleitungen wird eine Art Lötung besprochen werden, die auch in andern Fällen Verwendung finden kann. Der Mangel einer der Kupferlötung vergleichbaren Lötung des Aluminiums wird in seiner Bedeutung als Hindernis der Verwendung des Aluminiums bei weitem überschätzt. Im Kupferleitungsbau darf man heute in der Lötung nicht mehr eine Verbindung überhaupt erblicken, sondern nur eine Vollendung des durch eine mechanische Verbindung hergestellten Kontaktes. Für manche Fälle ist die Lötung an Freileitungen, welche mechanisch stärker beansprucht sind, durch Vorschriften der Behörden oder der Pflichtenhefte auch bei Kupfer verboten. In der Vermeidung jeglicher Lötung bei elektrischen Leitungen wäre überhaupt wohl ein technischer Fortschritt zu erblicken. Die einwandfreie Lösbarkeit von Verbindungen sowohl als auch die Beseitigung der auf freiem Felde unbequemen und im Innern von Gebäuden feuergefährlichen Lötwerkzeuge wäre vorteilhaft.

Für die Verbindung von Enden, sowie für die Abzweigung von Aluminiumleitungen sind mechanische Passstücke in genügender Auswahl und von einwandfreier Konstruktion und Anwendung in den Handel gebracht worden, die sich zum Teil mit Vorteil auch auf Kupferleitungen anwenden lassen. Sie werden bei den einzelnen Leitungsarten behandelt werden. Jeden-

Digitized by Google

falls kann allgemein gesagt werden, dass die bei Kupfer bedingt befriedigende Lötung bei Aluminium durch befriedigende reinmechanische Mittel ersetzt worden ist und dass auch sonst sogar eine Unmöglichkeit der Aluminiumlötung kein Hindernis für die Verwendung des Aluminiums für elektrische Leitungen sein kann.

5) *Niederschläge.*

Die Niederschläge von Feuchtigkeit aus der Luft in Form von Wasser, Eis, Reif und dergl. sind eine für den Bau und die Unterhaltung der Leitungen ausserordentlich wichtige Angelegenheit. Bei der Behandlung der hängenden Leitungen wird darauf näher eingetreten werden. An dieser Stelle soll nur darauf hingewiesen werden, dass das Aluminium wegen seiner physikalischen Eigenschaften die Niederschlagung von Feuchtigkeit jedenfalls nicht irgendwie merklich mehr begünstigt als das Kupfer. Es soll aber auch gleich bemerkt werden, dass das Verhalten der verschiedenen Metalle in dieser Beziehung einer systematischen wissenschaftlichen Untersuchung unterworfen werden sollte, sowohl unter künstlich nachgeahmten als auch unter natürlichen Verhältnissen der atmosphärischen Beschaffenheit der Umgebung und unter verschiedenen elektrischen Beanspruchungen. Die Beobachtungen in der Praxis werden häufig übertrieben und sind mit Bezug auf die in Betracht kommenden Nebenumstände lückenhaft und wissenschaftlich kaum verwertbar.

Die Ansicht, dass sich auf Aluminiumleitern unter Strom Niederschläge weniger leicht bilden wegen einer elektrostatischen Repulsion der Feuchtigkeitsteilchen, scheint nicht haltbar zu sein.

Allgemein lässt sich sagen, dass ein Aluminiumleiter von gegebener eigener Temperatur nicht wesentlich mehr Feuchtigkeit aus seiner Umgebung von gegebener Temperatur auf sich niederschlagen kann, als ein Kupferleiter unter den gleichen Temperaturverhältnissen. Es verhält sich die Wärmeaufnahmfähigkeit eines Aluminiumleiters zu derjenigen eines gleich langen Kupferleiters von gleicher Leitfähigkeit wie 1,2105 : 1 auf die Einheit des Gewichtes bezogen und wie 0,932 : 1 auf die Einheit der Oberfläche bezogen.

Diese Verhältnisse sind nicht massgebend für die totalen Mengen des auf dem Leiter absetzbaren Eises oder Reifes. Die Wärmeaufnahmefähigkeit des Leiters ist nicht nur bald erschöpft,

Digitized by Google

sondern ist überhaupt nur bei raschen Aenderungen des atmosphärischen Zustandes verfügbar, da bei Freileitungen die Querschnittsabmessungen meistens so klein sind, dass das Metall sehr rasch die Temperatur der Umgebung annimmt, und zwar gleichgültig, ob die Wärmeleitfähigkeit 0,343 wie bei Aluminium oder 0,819 wie bei Kupfer beträgt. Zu dem ist der physikalische Zustand eines bereits mit Eis oder Reif bedeckten Leiters aus Aluminium vom demjenigen eines solchen aus Kupfer in Hinsicht auf die Niederschlagungsfähigkeit kaum verschieden.

Von wesentlicher Bedeutung wird, systematische experimentelle und wissenschaftliche Feststellung vorbehalten, nur die geometrische Ausdehnung der wirksamen Ablagerungsflächen der Leiter und die daraus resultierende zusätzliche Belastung im Verhältnis zur ursprünglichen Eigenlast und zur Festigkeit des Querschnittes, sein, worauf bei den hängenden Leitungen einzutreten sein wird.

I. — *Getragene und liegende Leitungen.*

Getragene und liegende Leitungen sind solche, bei denen die Festigkeit des Leiters keine irgendwie entscheidende Rolle spielt. Sie haben meistens die Gestalt von Schienen oder Stangen, seltener von dicken Seilen. Sie finden Verwendung, wo aus irgendwelchen Gründen ein Leitungsgestänge unnötig oder ein Durchhang unzulässig ist. Sie befinden sich fast ausnahmslos in gedeckten Räumen auf Gestellen oder in Kanälen, unterstützt von Isolatoren in kürzeren Intervallen.

Leitungsfähigkeit und Abkühlungsfähigkeit und damit im Zusammenhang event. Unterteilbarkeit sind die massgebenden Requisite solcher Leiter. Es ist daher von vorneherein zu erkennen, dass ein Leitermetall von billigerem Preis und grösserem Querschnitt bezogen auf gleiche Leitfähigkeit wie das Aluminium dem Kupfer gegenüber bedeutende Vorteile bieten kann und wirklich bietet.

a) *In Erde verlegte Leiter.*

Aluminium ist im geringen Umfange schon vor 1904 für nackte in Erde verlegte sog. Rückleitungen in Verbindung mit dem stromführenden Geleise elektrischer Bahnen verwendet worden. Es hat sich sehr bald gezeigt, dass solche Aluminium-

Digitized by Google

leitungen in fast allen Bodenarten und immer beim Hinzutreten von Feuchtigkeit, insbesondere wenn zwischen dem Leiter und der Erde eine Spannungsdifferenz bestand, rasch angegriffen wurden.

Aluminium kann als nackter in die Erde verlegter Leiter unbedingt als nicht verwendbar betrachtet werden.

b) *Nicht in Erde verlegte Leiter.*

1) *Allgemeines.*

Als der billigere und steifere Leiter ist Aluminium für punktweise unterstützte Leitungen wie Sammelschienen, Maschinen- und Apparate-Verbindungsleitungen und Ofenleitungen unbestreitbar vorzüglich geeignet und zwar nicht nur da, wo es sich um grosse Querschnitte und damit um grosse Ersparnisse, sondern auch da, wo es sich um kleine Querschnitte und dabei um grosse Steifigkeit der Leiter handelt.

2) *Dilatation und Verbindungen.*

Dem Aluminium ist seine grössere Wärmedilatation gegenüber Kupfer vorgeworfen worden.

Der Wärmeausdehnungkoeffizient beträgt pro 100° C 0,002336 bei Aluminium, 0,001869 bei Kupfer. Nimmt man eine Maximaltemperaturdifferenz von 60° C an, so erhält man 1 cm. Gesamtdilatation bei einer Leiterlänge von 714 cm. bei Aluminium und 893 cm. bei Kupfer. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass das Aluminium infolge grösserer Abkühlungsfläche unter denselben Umständen, unter denen das Kupfer dilatiert, im allgemeinen eine geringere Temperatur annehmen und daher weniger dilatieren wird. Man ersieht aber auch sonst, dass bei beiden Metallen die Dilatation so gross ist, dass sie im allgemeinen nicht unberücksichtigt gelassen werden darf und dass bei Aluminium nicht viel öfter als bei Kupfer Dilatationsstücke eingebaut werden müssen.

Die Verbindungen bei Leitungen dieser Art, Aluminium oder Kupfer, werden durch Verschraubung bewirkt, wobei bei Aluminium grössere Flächen und dementsprechend mehr Schrauben angewendet werden müssen, ein Mehraufwand, der aber gar

Digitized by Google

nicht in Betracht kommt gegenüber der sonst durch nichts geschmälerten Ersparnis in solchen Fällen.

3) *Grosse Querschnitte.*

Getragene Leitungen von grossem Querschnitt stellen dasjenige Gebiet dar, in welchem das Aluminium vorteilhafter als irgendwo anders an Stelle des Kupfers treten kann. Das Aluminium sollte auf diesem speziellen Gebiete nahezu ein Monopol behaupten können.

4) *Kleine Querschnitte.*

Bei Sammelschienen für hochgespannte Ströme verlegt man die Unterstützungspunkte aus naheliegenden Gründen gerne etwas weiter auseinander; aus Rücksichten auf die Steifigkeit dieser Schienen muss man sehr häufig Querschnitte wählen, die unter Voraussetzung von Kupfer hinsichtlich Leitfähigkeit viel zu reichlich sind.

Hier kann Aluminium vorteilhaft an die Stelle des Kupfers treten, da es nicht nur auf gleiche Leitfähigkeit bezogen bei niedrigerem Preise einen grösseren Querschnitt besitzt, sondern weil es auch auf gleichen Querschnitt bezogen, wegen seines geringeren spezifischen Gewichtes eine bedeutend grössere Sicherheit gegen Einsenkung oder Ausbiegung besitzt. Auch für diese Zwecke sollte neben Aluminium im allgemeinen ein anderes Metall gar nicht in Frage kommen können.

II. — *Hängende Leitungen.*

1) *Allgemeines.*

Die hängenden Leitungen umfassen die sog. Freileitungen und damit den weitaus grössten Teil aller Leitungen. Sie sind daher auch das Hauptabsatzfeld für Leitermetalle. Die Verwendbarkeit des Aluminiums auf diesem Gebiet bildet den wichtigsten Teil der ganzen Aluminiumfrage für die Produzenten und die Konsumenten.

Bei den hängenden Leitungen kommt das mechanische Verhalten des Aluminiums an sich und als aufgehängter Leiter,

Digitized by Google

ruhend oder pendelnd, in Betracht. Das Problem wird relativ kompliziert und die erfolgreiche Anwendung des Aluminiums hat hier eine genaue Kenntniss der Mechanik der aufgehängten Leiter überhaupt und der Eigenschaften des Aluminiums im besondern zur Voraussetzung.

2) *Metalle.*

Auf dem Gebiet der hängenden Leitungen stehen sich nicht nur Aluminium und Kupfer als Konkurrenten gegenüber, sondern es treten auf Seite des Aluminiums das von der A. E. G. 1910 auf den Markt gebrachte Spreealuminium, auf der Seite des Kupfers verschiedene sog. Broncen von hoher Festigkeit.

Das Spreealuminium ist vermutlich eine schwachkupferige Legierung des Aluminiums. Nach W. von Möllendorff durfte 1910 Spreealuminium auf gleiche Erwärmung des Leiters bezogen 1,96, auf gleiche Leitfähigkeit bezogen 1,64 Mal soviel kosten, als Hartkupfer, gegen 2,30 bezw. 1,92 bei Aluminium. Die dem Berichterstatter bekannt gewordenen physikalischen Konstanten des Spreealuminiums sind in einer der Tabellen am Ende des Berichtes zu finden. Die Bruchfestigkeit des Spreealuminiums ist beträchtlich grösser als die des Aluminiums. Sie beträgt 26-35 Kg. pro mm² gegen 16-20 Kg. bei Aluminium. Die Dehnung bis zum Bruch beträgt aber nur 5-3 %, gegen 6-4 % bei Aluminium. Die Reisslänge, d. h. die Länge eines lotrecht hängenden Drahtes, welcher seinen eigenen Querschnitt am Aufhängepunkt gerade abreisst, beträgt nach W. von Möllendorff bei Hartkupfer 5,1 Km., bei Aluminium 6,7 Km., bei Spreealuminium 10,7 Km. und bei Stahl 10,3 Km.

Aus den angeführten Zahlen erkennt man, dass bei Aluminium ein günstigeres Verhältnis der Festigkeit zur Beanspruchung durch Eigenlast besteht als bei Hartkupfer, dass aber dieses Verhältnis bei Spreealuminium sich noch weit günstiger gestaltet gegenüber jenen beiden Metallen. Der Preis des Spreealuminiums ist etwas höher als der des Aluminiums. Aus einem Angebot vom Herbst 1910 auf ein Spreealuminiumseil von 430-460 mm² bestehend aus 61 Litzen ergibt sich ein Preis von Frs. 252,— pro 100 Kg. gegen Frs. 226,— für ein gewöhnliches Aluminiumseil von gleichem Querschnitt. Bei gleicher Leitfähigkeit würde das Spreealuminiumseil Frs. 285,— pro 100 Kg. kosten. Nach früherem entsprach dem Aluminiumseil-Kilogramm-

Digitized by Google

preis von Frs. 2,24 der Kupferseilkilogrammpreis von Frs. 1,66. Wir haben also folgende Nebeneinanderstellung:

	Spreealuminium	Kupfer
Preis des Seiles per Kg.	Frs. 2,52	1,66
Verhältnis	1,52 : 1	
Parität, auf gleiche Leitfähigkeit bezogen	1,64 : 1	
Ersparnis gegen Kupfer	ca. 7,3 %	

Daraus sieht man, dass der grosse Gewinn an Festigkeit beim Spreealuminium mit einer sehr erheblichen Einbusse an Leitfähigkeit verbunden ist und dass damit die Ersparnis, auf gleiche Leitfähigkeit bezogen, relativ gering wird, aber an dem üblichen Massstabe der Einkaufstechnik gemessen doch noch von wirtschaftlicher Bedeutung ist.

Ueber die Verwendung von Spreealuminium in grösserem Massstabe ist dem Berichterstatter nichts bekannt geworden. Die amerikanische und französische Praxis ist, soweit bekannt, auf gewöhnliches Aluminium beschränkt geblieben und dieses soll in der Folge allein in Vergleich mit Kupfer gezogen werden, ebenso wie die für Leitungen Verwendung findenden Broncen nicht berücksichtigt werden sollen.

Im übrigen scheint dem Berichterstatter das Problem der Aluminiumfreileitungen auf der Basis der Eigenschaften des reinen Aluminiums lösbar und gelöst zu sein. Legierungen von grösserer Festigkeit und geringerer Leitfähigkeit werden die Lösung einzelner Spezialprobleme (ganz grosse Spannweiten, ganz kleine Durchhänge) zu lösen gestatten, wo das Aluminium mechanisch nicht auszureichen vermag; aber diese Spezialfälle können die Entscheidung für die weit überwiegende Mehrheit der Freileitungen nicht zu Gunsten oder Ungunsten des einen oder andern Metalles entscheiden.

3) *Dehnung, Streckung.*

Das Aluminium hat eine bemerkenswerte Eigentümlichkeit, die in seiner sehr grössen Streckung bis zum Bruch besteht (4,5 %). Hierauf beruht eine erhebliche Anpassungsfähigkeit des Aluminiumdrahtes, falls er über seine Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht wird, sei es nun in folge zusätzlicher Belastung

Digitized by Google

durch Schnee und dergleichen, sei es infolge einer Montierung mit zu geringem Durchhang. Die Streckung des Aluminiums kann zur Folge haben, dass die damit verbundene Vergrösserung des Durchhanges die Seilspannung so vermindert, dass die Ursache zu weiterer Streckung und zum Bruch aufhört. Dies setzt aber eine vollständig unverletzte Oberfläche des aufgehängten Leiters voraus. In mehreren Fällen, wo Aluminium in der bei Kupfer zulässigen ziemlich rohen Weise transportiert und nachher mit den bei Kupfer üblichen Spannungen montiert wurde, haben sich Drahtrisse an den verletzten Stellen eingestellt.

Es ist nicht zulässig, Aluminiumleiter über steinigen Boden und über Isolatorenträger zu schleifen.

Es hat sich gezeigt, dass Aluminiumdrähte ohne sichtbare Veranlassung und ohne vorhergehende lokale Streckung glatt abrissen, und zwar, dass diese Brüche von Vibrationen herrührten, welche vom Gestänge auf die Drähte übertragen werden.

4) *Seile.*

Die Amerikaner haben daher frühzeitig von der Verwendung von Aluminiumdrähten überhaupt abgesehen und ausschliesslich Seile zur Verwendung gebracht. Seile sind nicht nur biegsamer als Drähte, sondern sie neigen auch weniger zu Vibrationen, da sie in ihrem Aufbau eine Dämpfung besitzen. Ein Seil stellt ausserdem eine Reserve in sich gegen Bruch durch zufällige Verletzung dar, da eine Verletzung immer nur eine oder wenige Litzen treffen und die Festigkeit des ganzen Seiles daher nur um wenig verringern wird. Die Beschränkung auf Seile, die in Amerika die durchaus feststehende Praxis ist, beeinträchtigt selbstverständlich, wegen des höheren Preises des Seiles gegenüber dem Draht, die erzielbaren Ersparnisse. Nimmt man 8 mm. als grössten praktischen Durchmesser von Kupferdrähten an, so hat damit ein Aluminiumseil von 83,4 mm² Querschnitt zu konkurrieren.

Stellen wir den früher berechneten, aber für den kleinen Querschnitt etwas erhöhten, Aluminiumseil-Kilogrammpreis neben den Kupferdraht-Kilogrammpreis, so finden wir:

Digitized by Google

	Aluminiumseil	Kupferdraht
Preis per Kg.	Frs. 2,30	Frs. 1,58
Verhältnis	1,46 : 1	
Parität, auf gleiche Leitfähigkeit bezogen . .	1,9-2,0 : 1	
Oder, wenn die Leitfähigkeit des Seiles etwas geringer angenommen wird	1,80-1,90 : 1	
Ersparnis	ca. 19-23 %	

Sobald die Querschnitte so gross werden, dass auch Kupferseile angenommen werden müssen, so stellt sich die früher berechnete Grösse der Ersparnis wieder ein. Noch grösser aber kann die Ersparnis dann werden, wenn z. B. ein Aluminiumseil von 167 mm² Querschnitt mit zwei Kupferdrähten von je 8 mm. Durchmesser in Konkurrenz tritt.

Alle diese Rechnungen gehen von dem Verhältnis 1,11 : 1 des Aluminiumpreises zum Kupferpreise (1910) aus. Im übrigen sind alle diese Rechnungen nur orientierend. Sie geben nur Grössenordnungen der verschiedenen Werte, keine verbindlichen Zahlen. Man sieht aber, dass bei Metallpreisen, wie sie 1910 bestanden, die Verwendung von Aluminiumseilen statt Kupferdrähten die früher für Drähte berechnete Ersparnis nicht sehr wesentlich beschränkt, dass diese Ersparnis vielmehr immer noch so gross ist, dass es geschäftlich kaum verantwortbar ist, darauf zu verzichten, es sei denn, dass sich im bestimmten Falle auf Grund eingehender Untersuchungen wirkliche technische Hindernisse zeigen.

5) *Montierung.*

Da das Gewicht der Aluminiumleiter geringer und das Volumen der zu transportierenden Lasten aus verschiedenen Gründen kaum grösser als bei Kupfer ist, wird der Transport zur Baustelle und die eigentliche Montierung weniger anstrengend und, in Zahlen ausgedrückt, im allgemeinen auch billiger sein. Können bei einer Leitung aus Kupferdraht mehrere Drahtquerschnitte in weniger Aluminiumseilquerschnitte vereinigt werden, so tritt auch eine Ersparnis an Montierungszeit hinzu.

Da Aluminiumleiter eine mechanisch leichter verletzbare Oberfläche besitzen, so müssen sie beim sogenannten ziehen der Leit-

Digitized by Google

ung sorgfältiger behandelt werden als Kupferdrähte. Es hat sich eine gewisse Technik herausgebildet, welche bequemes, rasches und sicheres Arbeiten gestattet. An den Isolatorträgern werden Flaschenrollen, wie sie bei Flaschenzügen vorkommen, so aufgehängt, dass das Aluminiumseil von der Seite her aufgelegt werden kann. Ueber diese Rollen wird das Aluminiumseil je nach Länge und Gewicht von Hand oder durch Tiere gezogen. Die Rollen gestatten einen selbsttätigen Ausgleich der Seilspannung zwischen den verschiedenen Spannweiten, welcher durch das Auflegen und Befestigen des Seiles auf die Isolatoren nicht mehr gestört wird.

In unwichtigen Fällen kann auch primitiver verfahren werden, allein die für Aluminium leiter beschriebene Methode stellt sicht als eine auch für Kupferleiter mit Vorteil anwendbare dar. Einer gewissen Mehrmühe zufolge der Rollen steht die geringere Mühe des Ziehens und die Sicherheit vor Beschädigung der Leiter gegenüber.

Die später noch besonders zu behandelnden Durchhänge müssen bei der Montierung von Aluminiumleitern gewissenhaft beachtet werden. Es fehlen Mittel, welche die Durchhänge mit der Genauigkeit messen lassen, welche eigentlich wünschbar wäre. Es trifft dies aber für Aluminium und für Kupfer zu. Ein Unterschied zwischen den beiden Metallen besteht nur darin, dass bei Kupfer infolge der grössern hiezu nötigen Zugkräfte die Versuchung geringer ist, den Leiter straff zu spannen, und dass infolge eines niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizienten die Aenderungen im Durchhang wegen der Temperaturänderungen bei Kupfer geringer sind, als bei Aluminium. Ein bei einer von der Minimaltemperatur erheblich abweichenden Montierungstemperatur straff gespannter Aluminiumleiter reisst sicher, wenn die Minimaltemperatur eintritt. Diese Tatsache stellt aber nicht einen Nachteil des Aluminiums dar; man sollte ihn eigentlich auch nicht als eine Gefahr bezeichnen; denn da diese Tatsache und die Regeln der richtigen Montierung bekannt sind, braucht man nur dementsprechend zu verfahren, um einem Reissen der Leiter vorzubeugen.

6) *Verbindungen.*

Da es sich bei Aluminium immer um Seile handelt, kommt als Verbindung die sogenannte Spleissung in Betracht. Dieselbe

Digitized by Google

wurde ursprünglich bei Aluminiumseilen nur aushülfsweise und in Notfällen verwendet. Es haben sich solche Spleissungen aber in der Folge als so dauerhaft erwiesen, dass sie auch als definitive Verbindungen gelten können. Eine Spleissung von Aluminiumseilen sollte je nach Durchmesser 0,9 bis 1,2 m. weit von jedem der beiden zu verbindenden Seilenden reichen.

Die Spleissung ist aber zeitraubender als die folgenden Verbindungen. Seile bis zu 120 mm² Querschnitt werden so miteinander verbunden, dass die beiden zu verbindenden Enden neben und gegeneinander in eine flachgedrückte Aluminiumröhre geschoben werden. Die Enden dieser Röhre werden dann mit zwei Klemmhebeln gefasst und um $2\,^1/_2$ bis 4 Umdrehungen gegeneinander verdreht. Dadurch entsteht ein Kontakt zwischen den Leitern, teils direkt, teils durch Vermittlung der Aluminiumröhre, von genügender Ausdehnung, genügendem Flächendruck, und genügender mechanischer Stärke.

Bei grösseren Querschnitten ist die beschriebene Verdrehung nicht mehr bequem auf der Baustelle ausführbar. Es findet dann die sogenannte Kompressionsverbindung Anwendung, welche in einem aus Aluminium hergestellten, zylindrisch längs durchbohrten, von der Mitte aus äusserlich konisch auslaufenden Stücke besteht. Die zu verbindenden Enden werden in die Bohrung dieses Verbindungsstückes eingeführt, bis sie zusammenstossen. Darauf wird das Verbindungsstück zwischen die Backen einer transportablen hydraulischen Presse gelegt und von der Mitte aus nach beiden Enden hin mit abnehmender Stärke zusammengepresst, derart, dass ein kompakter Körper entsteht, in welchem zwischen den Seilen und der Hülse Trennungsfugen nicht mehr sichtbar sind. Eine solche hydraulische Presse wiegt 100, ihr schwerstes Stück 75 kgr. Ihr Transport auf die Baustelle kann im Hinblick auf die übrigen zu transportierenden Lasten nicht ernstlich beanstandet werden.

Es werden aber auch Aluminiumseile schon in der Fabrik durch den Prozess der beschriebenen Kompression mit Enden versehen, welche Gewindezapfen besitzen. Auf der Baustelle werden dann die Seile durch ein Zwischenstück mit Links- und Rechtsgewinde verbunden. Der grösseren Bequemlichkeit und Raschheit dieser Verbindung steht die grössere Verletzlichkeit der mit Gewinde versehenen Seilenden bei Transport und Montirung gegenüber.

Abzweigungen von Aluminiumseilen werden vermittelst ge-

Digitized by Google

teilter, mechanisch durch Mutterschrauben aufgeklemmter, Abzweigungsstücke bewerkstelligt, wobei der abzweigende Leiter durch Kompression oder Lötung im Abzweigungsstück befestigt sein kann.

Die beschriebenen Verbindungen müssen als mechanisch einwandfrei bezeichnet werden. Sie entsprechen einer durchaus zur Uebung gewordenen Technik und widerlegen jeden Einwand, der sich auf die Schwierigkeit der Herstellung von Verbindungen in Aluminiumleitungen überhaupt stützt.

7) *Bindung, Abspannung.*

In Amerika ist frühzeitig beobachtet worden, dass Aluminiumleiter, welche seitlich in Rillen der Isolatoren gelegt wurden, infolge der Pendelungen im Winde und der Vibrationen des Gestänges unter Umständen eine Abnutzung erfahren, welche den Querschnitt so reduziert, dass Bruch eintritt. Es ist ebenso festgestellt worden, dass eine solche Abnützung stattfindet, wenn Aluminiumleiter mittels Bindedrähte aus wesentlich härterem Material befestigt wurden. Aus diesen Erfahrungen hat sich die feste Praxis herausgebildet, Aluminiumleiter ausnahmslos in die Rille auf dem Kopf des Isolators zu legen und die Bindung mittelst weichen Aluminiumdrahtes vorzunehmen. Eine Abnutzung ist dann erfahrungsgemäss ausgeschlossen.

8) *Zusatzbelastungen.*

Die Zusatzbelastungen rühren von den festen Niederschlägen auf den Leitern und vom Winddruck, unter Umständen von einer Kombination davon, her. Die Grösse der Zusatzlasten ist im allgemeinen der Projektion der Oberfläche oder dem Durchmesser des Leiters proportional, woraus sich ergibt, dass Aluminiumleiter im allgemeinen grösseren Zusatzbelastungen unterworfen sein können, als Kupferleiter gleicher Leitfähigkeit. So ist einem Kupferdraht von 8 mm. Durchmesser ein Aluminiumseil von 12 mm. Durchmesser gegenüber zu stellen. Dagegen kann ein Aluminiumseil von 16 mm. Durchmesser die Stelle von 2 Kupferdrähten von 8 mm. einnehmen. Die Verhältnisse der Zusatzlasten können sich bei grösseren Gesamtquerschnitten, welche zu einer Unterteilung der Kupferdrähte Anlass geben, für Aluminiumleiter günstiger gestalten.

Digitized by Google

Auf Grund der vielfach behaupteten, aber nach Ansicht des Berichterstatters einer wissenschaftlichen Kontrolle bedürftigen, Erfahrung, ist die Menge der festen Niederschläge auf Leitern oberhalb eines gewissen Durchmessers von diesem mehr und mehr unabhängig. Daraus würde folgen, dass mit zunehmenden Durchmessern der Unterschied zwischen der abgelagerten Niederschlagsmenge auf dem Kupferleiter und auf dem dickern Aluminiumleiter immer geringer würde. Man rechnet jedenfalls sicher, wenn man die Menge festen Niederschlags auf Leitern, dem Winddruck ähnlich, dem Durchmesser proportional setzt.

Betreffend den Winddruck sei auf den Bericht von Buck am Congress in St.-Louis 1904 verwiesen.

Die zu berücksichtigenden Zusatzlasten werden in der Regel normiert auf Grund anzunehmender, öfters wiederkehrender, Verhältnisse. Darüber hinaus noch ungünstiger liegende Verhältnisse, die unter Umständen eintreten können, müssen als durch die für die Leitung vorgeschriebene Bruchsicherheit genügend gedeckt angesehen werden. Liegen an einem Orte besondere klimatische Verhältnisse oder besonders grosse Spannweiten oder kleine Durchhänge vor, so ist ein eingehendes Studium der blossen Befolgung von Normen vorzuziehen.

Der Aluminiumleiter ist in keinem Falle von vorneherein als der schwächere oder gefährlichere anzusehen, sei er zusätzlich belastet oder nicht. Die Gefahr tritt erst dann ein, wenn der Aluminiumleiter mit einem unrichtigen Durchhang montiert wurde, welcher sich bei minimaler Temperatur so sehr verringert, dass Bruchspannung eintritt.

9) *Durchhang.*

Betrachtet man einen Aluminium- und einen Kupferleiter, beide so gespannt, dass sie dieselbe Seilkurvengestalt annehmen, so ist der Kupferleiter der stärker beanspruchte. Die Bruchsicherheiten der beiden Leiter verhalten sich wie die Reisslängen, d. h. nach v. Möllendorff wie $6{,}7 : 5{,}1 = 1{,}32$. Die Sicherheit des Aluminiumleiters ist daher 1,32, wenn diejenige des Kupferleiters 1 ist. Betrachtet man einen Aluminiumleiter von 50 mm² Querschnitt oder 9,2 mm. Seildurchmesser, äquivalent einem Kupferquerschnitt von 30 mm², und nimmt man an, das spezifische Gewicht der festen Niederschläge auf dem Leiter betrage 0,88, so findet man, dass sich eine 9 mm. dicke Schicht auf dem Alu-

Digitized by Google

miniumleiter ablagern dürfte, bis seine Bruchsicherheit ebenfalls auf 1 heruntersinken würde.

Spannt man die beiden Leiter von gleicher Seilkurvengestalt gleichzeitig immer mehr, so dass sie stets dieselbe Kurvengestalt bewahren, so reisst der Kupferleiter früher als der Aluminiumleiter. Der Aluminiumleiter ist also der sicherere und zwar, wenn nicht ganz ausserordentliche Winddrucke hinzukommen, auch unter allen Umständen der Zusatzbelastung.

Wenn man aber die beiden Leiter von gleicher Seilkurvengestalt einer starken Temperaturerniedrigung unterwirft, so verkürzt sich der Aluminiumleiter, dessen Wärmeausdehnungskoeffizient 25 % grösser ist als derjenige des Kupfers, je nach dem Ausgangsdurchhang so viel mehr als der Kupferleiter, dass der Durchhang bei der erniedrigten Temperatur so viel geringer und dementsprechend der Seilzug so viel grösser als beim Kupferleiter ausfällt, dass Bruch eintreten muss.

Aus dem geht hervor, dass alles darauf ankommt, dem Aluminiumleiter bei der Montierungstemperatur einen solchen Durchhang zu geben, dass bei der niedrigsten anzunehmenden Temperatur die Seilspannung inklusive anzunehmende Zusatzbelastungen innerhalb der Bruchfestigkeit oder eines vorgeschriebenen Teils derselben bleibt. Man sieht, dass der Aluminiumleiter an sich der sicherere ist und dass eine allfällige Unsicherheit immer nur eine Folge bei der Montierung unrichtig bemessener Durchhänge ist.

Die bei den verschiedenen Temperaturen anzuwendenden Durchhänge sind von einigen Aluminiumwerken in Tabellen herausgegeben worden. Bei der Benützung solcher Tabellen ist auf die zu Grunde liegende Normierung der extremen Temperatur und der Zusatzbelastungen zu achten. Wer solche Tabellen benützen will, sollte imstande sein, sie richtig zu beurteilen und auf andere Normen, insbesondere auf die im betreffenden Lande behördlich festgesetzten, umzurechnen.

Das empfehlenswerteste wird aber sein, die Verantwortlichkeit der Aluminiumwerke zu engagieren und sich deren ausgedehnte Erfahrung zu Nutze zu ziehen, in der Art, wie es in Amerika geschehen ist.

10) *Gestänge.*

Da der Aluminiumleiter nur etwa halb so viel wiegt, wie der Kupferleiter gleicher Leitfähigkeit, so ergibt sich eine dement-

Digitized by Google

sprechend bedeutende Mindergewichtsbelastung der Gestänge und Isolatoren. Kann Vereinigung mehrerer Kupferdrahtquerschnitte zu weniger Aluminiumseilquerschnitten vorgenommen werden, so tritt auch eine Verminderung der Anzahl der Isolatoren ein. Da die Aluminiumleiter wegen ihres Durchhanges grössere Abstände zwischen sich haben müssen, so werden die Isolatoren auf den Gestängen entsprechend weiter auseinander gesetzt werden müssen. Bei der meistens auf 6 beschränkten Anzahl von Leitern auf demselben Gestänge hat dies aber keine Folgen für die Belastung oder die Kosten der Gestänge. Je grösser der Gesamtquerschnitt der Leitung und je ungünstiger die Annahme betreffend den höchsten einseitig auftretendem Zug in Folge supponirten einseitigen Reissens von Leitern ist, desto vorteilhafter stellt sich das Aluminium gegenüber dem Kupfer. Allgemein kann man Bestimmtes nicht sagen, ausser dass die Fälle sehr selten sein werden, wo das Gestänge für Aluminiumleiter teurer als für Kupferleiter sein wird.

Ungünstig für Aluminium wird sich der Fall am ehesten dann gestalten, wenn Holzgestänge von beschränkter Länge verwendet werden müssen. Infolge des grössern Durchhanges der Aluminiumleiter bei maximaler Temperatur kann es dann eintreten, dass die Spannweite vermindert und die Zahl der Stangen vermehrt werden muss. Es kann sich dann ereignen, dass die Mehrkosten für das Gestänge zu viel von den Ersparnissen an den Leitern aufzehren, was um so eher der Fall sein kann, je kleiner der Gesamtquerschnitt der Leitung ist. Es muss aber jeder Fall für sich untersucht werden. Bei den Leitungen mit Spannweiten von 150 m. werden die Resultate einer Vergleichsrechnung mitgeteilt werden.

11) *Elektrisches Verhalten der Leitung.*

Die Vergrösserung der Abstände zwischen den Leitern vergrössert die Selbstinduktion der Leitung. Die Zunahme der Selbstinduction verlangsamt sich aber, je grösser der Abstand, und gleichzeitig, je grösser der Durchmesser der Leiter wird. Die Zunahme der Selbstinduktion gestaltet sich daher bei Aluminium gegenüber Kupfer zu einer sehr wenig belangreichen Angelegenheit. Bei hohen Spannungen müssen grosse Leiterabstände so wie so genommen werden, gleichgiltig, ob es sich um

Digitized by Google

Aluminium oder Kupfer handelt, so dass die Unterschiede in der Selbstinduktion zwischen Aluminium- und Kupferleitungen im allgemeinen ohne praktische Bedeutung sind. Die Abstände zwischen den Leitern müssen im übrigen so bemessen werden, dass bei phasenungleicher Pendelung im Winde eine solche Annäherung der Leiter nicht eintritt, welche zu Ueberschlägen führt. Es wäre aber irrig anzunehmen, dass benachbarte Leiter je mit sehr grosser Phasenverschiedenheit pendeln. Die Pendelung benachbarter Leiter hat dieselbe äussere Ursache, ihre Schwingungsdauer ist auch nahezu dieselbe, so dass es einer grossen Zahl von Schwingungen bedürfte, bis sich eine erhebliche Phasenverschiedenheit herausbilden könnte. Ein förmliches Gegeneinanderschwingen wird nur ausnahmsweise bei ganz kurzen und unregelmässig sich wiederholenden scharfen Windstössen eintreten können.

Der grössere Querschnitt der Aluminiumleiter ist, wenn auch bei den gebräuchlichen Periodenzahlen von 25-50 nur unbedeutend, für die Fortleitung des Wechselstromes an sich günstig. Viel wichtiger ist die Vermehrung der Kapazität zu Folge grösseren Anerschnittes, deren Wirkung derjenigen der Selbstinduktion entgegengesetzt ist und sie häufig übertreffen wird, so dass eine Erhöhung des Leistungsfaktors der Uebertragung eintritt, verglichen mit der Kupferleitung von gleicher Leitfähigkeit.

In elektrisch-physicalischer Beziehung ergeben sich somit keine Nachteile, vielmehr in allgemeinen Vorteile aus der Verwendung von Aluminium an Stelle des Kupfers.

a) *Spannweiten bis 50 m.*

Spannweiten bis 35 m. sind sehr gebräuchlich bei Verteilungsnetzen in Ortschaften und Fabrikanlagen, auch im Innern von Gebäuden, namentlich aber bei Speiseleitungen von Strassenbahnen.

Die Querschnitte der einzelnen Leiter sind im allgemeinen beträchtlich. Der Gesamtquerschnitt wird selten weniger als 150 mm² betragen. Auch bei Kupfer werden häufig Seile angewendet. Die Gestänge bestehen meistens aus Holz.

Die Spannweite bis 50 m. ist in vielen Ländern, wie z. B. in der Schweiz, bei grösseren Fernleitungen gebräuchlich. Unterteilung des Querschnittes ist bei Kupferleitungen sehr häufig

Digitized by Google

zu dem Zwecke, Drähte statt Seile zu verwenden. In einer solchen Unterteilung eine Reserve zu erblicken, ist ein Irrtum, solange die sämtlichen Leiter am gleichen Gestänge hängen, so dass die nicht unterteilte Leitung aus Aluminiumseil nicht als weniger betriebsicher angesehen werden darf. Diese Kategorie von Leitungen erscheint geeignet für die Verwendung des Aluminiums, obwohl in zahlreichen Fällen zufolge behördlicher Vorschriften über die minimale Höhe der tiefsten Punkte der Leiter über dem Boden eine geringe Verlängerung der Gestänge oder eine geringe Verkürzung der Spannweiten notwendig sein wird. Die Beanspruchung der Stangen, und das ist bei Holzstangen besonders wichtig, gestaltet sich bei Aluminium wesentlich günstiger als bei Kupfer infolge der geringeren einseitigen Züge bei supponierten einseitigen Drahtbrüchen.

Eine äusserst ausgedehnte Verwendung haben Aluminiumseile als Speiseleitungen bei elektrischen Bahnen gefunden; die Spannweiten betragen höchstens 50 m. In Anbetracht der beträchtlichen Querschnitte und der Wünschbarkeit, das Gestänge der Kontaktleitungen durch die Speiseleitungen möglichst wenig mehr zu belasten, erscheint das Aluminium sehr vorteilhaft für solche Speiseleitungen.

b) *Spannweiten bis 150 m.*

Für lange Hochspannungsleitungen wird auch in Ländern mit zur Zeit noch hinderlichen behördlichen Vorschriften die 50 m. übersteigende und bis 150 m. reichende Spannweite immer mehr Eingang finden. Die Verminderung der Zahl der Isolatoren, welche durch Verminderung des Leitergewichtes noch besonders begünstigt wird, erhöht die Betriebssicherheit. Die grössern Leiterabstände und Durchhänge können bei hohen Leitungsträgern als Uebelstand gegenüber Kupfer kaum empfunden werden. Wenn man einmal von der einfachen Leitungsstange abgeht, so kommt es auf eine Erhöhung von 1-3 m. nicht mehr stark an, umsoweniger, als wegen des geringen Leitergewichtes die supponierten einseitigen Züge und entsprechenden Biegungsmomente entsprechend geringer sind.

In dem ausgezeichneten Buch von H. M. Hobart ist eine Vergleichsrechnung in allen Details durchgeführt für eine Leitung mit zweimal drei Seilen von je 200 mm² Querschnitt bei

Digitized by Google

Aluminium und 120 mm² bei Kupfer. Es ist Drehstrom von 40000 Volt angenommen, ferner eine Maximalzugbeanspruchung von 4,5 kg. pro mm² bei Aluminium, 10,0 kg. bei Kupfer (4 fache Bruchsicherheit), ein Winddruck von 150 kg. pro m² bei 0° C. und eine Maximaltemperatur der Luft von 60° C., der Leiter von 80° C.

Es ergibt sich folgende Nebeneinanderstellung der Werte für die Aluminiumleitung und die Kupferleitung:

	Aluminiumleitung	Kupferleitg.
Maximaler Durchhang	6,4 m.	5,0 m.
Höhe der Leitungstürme	10,5-21,5 m.	18,1-20,1 m.

(Die grössere Zahl entspricht einer Verlängerung des Gestänges zur Aufnahme eines Blitzschutzdrahtes.)

Maximale Belastung durch Leitergewicht	475 kg.	940 kg.
Maximaler einseitiger Zug bei einseitigem Reissen von 4 Leitern und maximalem Winddruck . .	3600 kg.	4800 kg.
Biegungsmoment am Gestänge . .	70000 mkg.	87000 mkg.

Hieraus ergibt sich, dass die Gestänge (Leitungstürme) für die Aluminiumleitung auf keinen Fall teurer sein werden, als diejenigen für die Kupferleitung. Für die ganzen betrachteten Leitungen gibt Hobart folgende Erstellungskosten pro km.:

	Aluminium	Kupfer
Leitungstürme mit Isolatoren	Fr. 12600	Fr. 12600
Leiter	„ 8200	„ 11800
Zusammen	Fr. 20800	Fr. 24400
	Verhältnis 0,855 : 1.	

Das vorliegende Beispiel entspricht einer grösseren Kraftübertragungsleitung für 25000-30000 Kw. und zeigt, dass Ersparnisse von sehr erheblicher Grösse möglich sind.

Digitized by Google

c) *Spannweiten über 150 m.*

1) *Allgemeines.*

Es sind bei Kraftübertragungsleitungen vereinzelte Spannweiten bis zu 400 m. angewendet worden. Solche Leitungsteile sind Werke der Ingenieurkunst und lassen sich nicht allgemein behandeln. Sie können vielmehr nur erfolgreich sein, wenn sie mit der vollständigen Kenntnis der Verhältnisse am Bauort unternommen werden. Die Niagara, Lockport and Ontario Power Co. hat auf einem grossen Teil ihrer Hauptfreileitungen 550 Fuss = 170 m. Normalspannweite, daneben einzelne Spannweiten von 950, 1200 und 1253 Fuss. Die Leiter sind ausser auf einem Teil der Leitung zwischen Syrakus und Mortimer sämtlich aus Aluminium. Die Drehstromspannung ist 60000 Volt.

Während man bei Ueberquerung tiefer Täler den Durchhang innerhalb weiter Grenzen beliebig wählen und dadurch die Seilspannungen auch bei minimaler Temperatur unterhalb der zulässigen Grenze halten kann, ist es fraglich, ob Aluminium in jedem andern Falle sehr grosser Spannweite eine gute Lösung zulässt. Bei Ueberquerungen von Sümpfen mittels sehr grosser Spannweiten, wo man einen Kompromiss zwischen der Höhe der Leitungstürme und der Veränderung des Durchhanges schliessen muss, wird sich Kupfer oder Bronce günstiger stellen als Aluminium.

2) *Spreealuminium.*

In Fällen, wie der letzte, bietet das Spreealuminium mit seiner Bruchfestigkeit von 30 kg. pro mm² gegen 18 bis 23 kg. pro mm² des Aluminiums und bei einem spezifischen Gewicht von 0,28 gegen 0,27 des Aluminiums trotz seiner geringern Leitfähigkeit von nur ca. 85 % desjenigen des Aluminiums ein bedeutendes Interesse. Die grössere Festigkeit gestattet einen kleinern minimalen Durchhang, der maximale Durchhang bei Spreealuminium wird aber doch nicht sehr ausschlaggebend geringer sein als derjenige des gewöhnlichen Aluminiums, weil der Wärmeausdehnungskoeffizient des Spreealuminiums pro 100° C. 0,0022 beträgt gegen 0,0023 des gewöhnlichen Aluminiums.

Digitized by Google

3) *Aluminium und Stahl kombiniert.*

Die Aluminium Co. of America hat eine zeitlang Aluminiumleiter von sehr grosser Bruchfestigkeit dadurch hergestellt, dass sie Aluminium um eine Stahlseele von bestgeeignetem Stahl aufpresste. Sie hat diesen Prozess jedoch aufgegeben, weil die Abnützung der Werkzeuge den Preis des Fabrikates zu sehr erhöhte. Dagegen hat dieselbe Gesellschaft mit Erfolg Aluminiumseile mit einer Stahlseele hergestellt und einige Leitungen mit weiten Talüberquerungen ausgeführt, die zu keinerlei Klagen Anlass gegeben haben. Die Untersuchung von der Atmosphäre während mehrerer Jahren ausgesetzten Seilen hat gezeigt, dass die Aluminiumlitzen sich so innig um die Stahlseele anpresten, dass nicht die geringste Rostung oder galvanische Aktion bemerkbar wurde. Die grosse Vorsicht, welche den Amerikanern die Erfolge im Bau von Aluminiumleitungen gesichert hat, hat sie aber bis jetzt davon abgehalten, die Aluminiumstahlseile mit besonderem Nachdruck zu empfehlen und zu verkaufen, da sie die Möglichkeit einer gelegentlichen Rostung und Schwächung der Stahlseele noch nicht als genügend ausgeschlossen betrachten.

4) *Folgerungen.*

Wenn auch für ganz grosse Spannweiten unter besonders erschwerenden Verhältnissen das Aluminium, event. auch eine Legierung desselben, Verwendung nicht finden könnte, so wäre dies kein Grund, die übrigen Leitungen derselben Anlage nicht aus Aluminium herzustellen und die damit verknüpften Vorteile zu verschmähen, noch weniger aber ein Grund, die Leitungen von Anlagen, in denen solche ganz ausserordentliche Spannweiten gar nicht vorkommen, aus Kupfer herzustellen und damit auf grosse Ersparnisse ohne Einbusse an technischer Güte zu verzichten.

B) Isolierte Leitungen.

Bei gleicher Leitfähigkeit wird die event. mechanisch noch armierte Isolierung des Aluminiumleiters mehr kosten als diejenige des Kupferleiters. Der Unterschied verringert sich, wenn

Digitized by Google

auf gleiche Erwärmung der Leiter abgestellt wird. Die Mehrkosten der Isolation müssen aus den Minderkosten des metallischen Leiters gedeckt werden. Dies ist offenbar bei grösseren Querschnitten und billiger Isolation reichlich möglich.

Welches für die verschiedenen Isolierungsarten der Querschnitt ist, bei dem Parität von Aluminium und Kupfer eintritt, lässt sich nicht allgemein in bestimmten Zahlen angeben, ist aber in jedem einzelnen Falle auf Grund verbindlicher Angebote leicht zu ermitteln.

Die Behandlung der isolierten Aluminiumdrähte und Seile ist, soweit der Metallleiter in Betracht kommt, derjenigen der nackten Aluminiumleiter gleich, soweit die Isolation in Betracht kommt, derjenigen der isolierten Kupferleiter gleich.

1) *Liegende Leitungen.*

a) *Installationsleitungen (Drähte).*

Unter Installationsleitungen sind die für die Stromverteilung an die einzelnen kleinen Verbrauchsapparate (Lampen, kleine Motoren, Kochapparate) im Innern von Gebäuden benutzten Leitungen zu verstehen.

Da es sich meistens um kleine Querschnitte handelt, also um Drähte, bei denen die Isolierungshülle viel kostet im Verhältnis zum Metallleiter, so bietet das Aluminium kein grosses Interesse. Wenn auch eine Ersparnis im allgemeinen erzielbar sein wird, so ist sie doch nicht so verlockend und nicht annähernd so bedeutend wie bei nackten Leitungen grösserer Querschnitte und Längen.

Installationsleitungen müssen häufig mit besonderer Rücksicht auf ihre Erwärmung bemessen werden, so dass dann das Aluminium unter Umständen einen erheblichen Vorteil zu bieten vermag.

Der Verzicht auf eine Lötung der Verbindungen von Installationsleitungen aus Aluminium kann nicht als Nachteil angesehen werden. Der Lötprozess ist mit erheblicher Feuergefahr verbunden und auch sonst geht die Tendenz dahin, unzugängliche Verbindungen zu vermeiden und die Abzweigungen lösbar und zugänglich zu machen, was mit Aluminiumleitern nicht schwieriger durchführbar ist als mit Kupferleitern.

Digitized by Google

b) *Kabel.*

1) *Aluminium für Kabel überhaupt.*

Von grösserer Bedeutung ist die Verwendbarkeit und Verwendung von Aluminium für Kabel. Apt (E. T. Z., 1908, Heft 8 & 9) hat gezeigt, dass das Aluminium für höhere Spannungen bei Kabeln ausser ökonomischen auch elektrisch-physikalische Vorteile gegenüber Kupfer bietet.

Bei langen Kabeln für die Uebertragung grösserer Effekte werden Aluminiumleiter nach Massgabe des zulässigen Effektverlustes bemessen. Bei kurzen Kabeln (z. B. Verbindungsleitungen zwischen Maschinen und Schaltanlagen), wo die Erwärmung die Bemessung der Querschnitte fast ausschliesslich bestimmt, ist die Situation für das Aluminium besonders günstig, da die Querschnitte geringer, als bei gleicher Leitfähigkeit dem Kupfer entspricht, gewählt werden dürfen.

Es ist einleuchtend, dass Aluminium in erster Linie für Kabel mit wenig oder mit billiger Isolation in Frage kommt, also für einadrige und für nicht mit Gummi isolierte Kabel.

Es sind schon namhafte Kabel aus Aluminium verlegt worden, welche durchaus befriedigen. Die Ersparnisse bei deren Verwendung an Stelle von Kupferkabeln lassen sich mit den bei nackten Leitungen erzielbaren nicht vergleichen. Wenn aber das Aluminium als Kabelleiter einmal das Zutrauen der Kundschaft allgemeiner geniesst, so wird zu seinen Gunsten ebenso gewiss entschieden werden, wie bei Kupferkabeln zu Gunsten des einen oder andern Lieferanten, wenn Preisunterschiede von nur wenigen Procenten zu seinen Gunsten vorliegen.

2) *Verbindungen.*

Aluminiumkabelverbindungen können in derselben Weise gemacht werden, wie andere Aluminiumleiterverbindungen. Wegen ihrer Geschütztheit vor Feuchtigkeit und wegen der Abwesenheit jeglicher mechanischer Beanspruchung können sie kleiner bemessen werden als diejenigen für Freileitungen. Bei allen unterirdischen und bei allen Hochspannungskabeln liegen die Verbindungen in mit Isoliermasse gefüllten Kabelkästen, sodass die Gefahr galvanischer Aktion vollständig ausgeschlossen ist.

Digitized by Google

Bei Kabelverbindungen wird mit Erfolg eine Art von Verlötung angewendet. Dieselbe wird von Raphael und Sparks in Electrical Engineering, 24 November 1910 und 9 Februar 1911, beschrieben, wie sie in Ealing mit Erfolg angewendet worden ist.

Nach der Vorschrift der Aluminium Co. of America werden Kabelenden, die durch Lötung verbunden werden sollen, zuerst verzinnt. Die verschiedenen Lagen der Litzen werden treppenförmig zurückgeschnitten, jede Stufe etwa 12 mm. breit; darauf wird das Kabelende über ein Gefäss gehalten, welches eine geschmolzene Mischung von 65 % Zinn, 34 % Zink und 1 % Aluminium enthält, und durch Uebergiessung damit erwärmt. Ist die Erwärmung erreicht, so wird mit einer Stahlkratzbürste die Oxydschicht auf der Oberfläche des Aluminiums unschwierig entfernt, worauf die Metallmischung sofort haftet. Die so verzinnten Enden der zu verbindenden Kabel werden in eine etwa 12 1/2 cm. lange, aufgeschlitzte Hülse aus Aluminium geschoben, durch Uebergiessen mit geschmolzenem Blockzinn erwärmt und schliesslich verlötet.

Diese selbe Methode wird für das Einlöten von Kabeln in Kabelschuhe und Abzweigungsklemmstücke angewendet.

II. *Hängende Leitungen.*

Hängende Aluminiumleiter, welche mit Isolierung bedeckt sind, werden in der Praxis entweder solche mit mässigen Spannweiten (Speiseleitungen elektrischer Bahnen) oder solche mit kleinen Spannweiten unter Dach sein. Es genügt, darauf hinzuweisen, dass die Gegenwart einer isolierenden Hülle an der Erwägung betr. die Festigkeit und den Durchhang nichts wesentliches ändert. Neue Unbekannte treten bei der Verwendung isolierter Aluminiumleiter für hängende Leitungen nicht auf. Verbindungen durch Lötung sollten wenigstens überall da vermieden werden, wo die Leiter grössere Zugspannungen aushalten sollen, also auch überall da, wo die Leitungen möglichst kleine Durchhänge annehmen müssen. Jede Lötung hat eine Ausglühung des Leiters und eine entsprechende erhebliche Herabsetzung der Festigkeit zur Folge.

Digitized by Google

***

Schwachstromleitungen.

Telephon- und Telegraphenleitungen werden in der Regel aus Drähten von weniger als 15 mm² Querschnitt gebildet. Es hat die Erfahrung in den Vereinigten Staaten von Amerika gelehrt, dass wenigstens unter den dortigen klimatischen Verhältnissen selbst geseilte Aluminiumleiter nie weniger als 27 mm², lieber aber nicht weniger als 42 mm² Querschnitt haben sollten, wenn die damit gebauten Leitungen wirklich dauerhaft sein sollen. Diese Aluminiumquerschnitte entsprechen bei gleicher Leitfähigkeit 16 bezw. 25 mm² Kupferquerschnitt oder 2,26 bezw. 2,85 mm. Kupferdrahtdurchmesser. Daraus ergibt sich, dass sich nach der Erfahrung in den Vereinigten Staaten das Aluminium für Schwachstromleitungen als nicht geeignet herausgestellt hat.

Es kommt dazu, dass Schwachstromleitungen sehr häufig aus vielen Drähten bestehen, die möglichst kleine Abstände bei grossen Spannweiten einhalten müssen. Der grössere Durchhang der Aluminiumleiter steht dem im Wege; gleichzeitig vergrössert der grössere Durchmesser der Aluminiumdrähte die Winddruckflächen beträchtlich, so dass die Gestänge stärker gebaut werden müssen. Die zufälligen und zusätzlichen Belastungen sind überhaupt bei grossen Schwachstromleitungen die entscheidenden, wenn auch die unbekannten. Es ist unwahrscheinlich, dass man Schwachstromleitungen aus Aluminiumdrähten noch mit Holzgestängen ausführen könnte; auch Spreealuminium, obwohl es sehr kleine Minimaldurchhänge zulässt, unterscheidet sich in den Maximaldurchhängen infolge Wärmedilatation doch zu wenig von gewöhnlichem Aluminium, als dass es in der Concurrenz mit Kupfer oder Bronce für grössere Telephon- oder Telegraphenleitungen siegreich sein könnte. Schwachstromleitungen von geringer Länge bieten auch bei Verwendung von Aluminium selbstverständlich keine Schwierigkeiten, stellen aber kein Verwendungsgebiet von irgend welcher Bedeutung dar.

Schwachstromfernleitungen erscheinen nicht als ein Gebiet, auf welchem das Aluminium grössere Bedeutung erlangen könnte. Seine Verwendung auf diesem Gebiet könnte vielmehr sein Ansehen und seine Verbreitung auf geeigneteren Gebieten beeinträchtigen.

Digitized by Google

Conclusionen:

1) Aluminiumleiter müssen entsprechend den charakteristischen Eigenschaften des Aluminiums behandelt werden; diese Behandlung ist verschieden von derjenigen des Kupfers; sie ist nicht schwieriger; sie ist zu einer bestimmten Technik bereits ausgebildet.

2) Aluminiumleitungen und Kupferleitungen in derselben Anlage bedingen keine nachteilige Uneinheitlichkeit.

3) Bei den gegenwärtigen Aluminium- und Kupferpreisen sind die durch die Verwendung des Aluminiums ermöglichten Ersparnisse so gross, dass sie von der Praxis unmöglich unberücksichtigt und unbenützt gelassen werden dürfen.

4) Die Ersparnisse sind am grössten bei nackten getragenen Leitungen (Sammelschienen und dergl.), dann folgen die schweren Leitungen mit mässigen Spannweiten, sodann die Fernleitungen, namentlich mit Querschnitten von 100 mm^2 und mehr pro Zweig, endlich isolierte Kabel, namentlich einadrige von grösserem Querschnitt und mit anderer als Gummiisolation.

5) Für die Stromleitung an sich bietet das Aluminium gegenüber dem Kupfer Vorteile.

6) Bei Installationsleitungen geringen Querschnitts sind mit der Verwendung des Aluminiums im allgemeinen keine bemerkenswerten Ersparnisse verbunden.

7) Bei Schwachstromfernleitungen erscheint das Aluminium aus mechanischen Gründen nicht anwendbar.

8) Bei nackten, in die Erde verlegten, Leitungen ist das Aluminium aus chemischen Gründen nicht verwendbar.

Digitized by Google

Literatur über Aluminium für elektrische Leitungen.

1899. — *Notes on aluminium and its alloys.* The British Aluminium Comp. Ltd.

1900. — *Aluminium versus copper for electrical purposes* (second edition). The British Aluminium Comp. Ltd.

1904. — *The use of aluminium as an electrical conductor* (St.-Louis International Electrical Congress, 1904). H. W. Buck.

1906. — *The erection of aluminium wires and cables.* The Pittsburgh Reduction Comp.

1907. — *Aluminium for electrical conductors.* Aluminium Company of America (Pittsburgh).

1907. — *The transmission plant of the Niagara, Lockport and Ontario Power Company.* Ralph D. Mershon, M. E. Chief Engineer.

1908. — *Aluminium versus copper for electrical conductors.* The British Aluminium Comp. Ltd.

1908. — *Rapport sur l'emploi de l'aluminium comme conducteur électrique* (Marseille Internat. Congress, 1908). E. Dusangey, ingénieur, directeur général du Sud Électrique.

1908. — *Hochspannungskabel und Hochspannungs-Kraftübertragungen* (E. T. Z. 1908, Heft 8 u. 9), Richard Apt.

1909. — *L'uso dell'alluminio come conduttore dell'Elettricità* (L'Elettricista, 1909, nn. 10 e 13), Ing. Elvio Soleri.

1909. — *Mitteilungen aus dem Kabelwerk*, N. 52. Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Berlin.

1910. — *Bare aluminium cables* (The Electrical Times, London). H. A. Hobart.

1910. — *Metalle für Freileitungen* (E. T. Z. 1910, Heft 14). W. v. Möllendorff, Dipl. Ingenieur.

1911. — *Renseignements généraux sur l'emploi de l'aluminium pur et de haute conductibilité comme conducteur électrique.* Société Électro-Métallurgique Française.

1911. — *Aluminium versus copper cables for low-tension feeders and distributors on underground networks* (Electrical Engineering. Nov. 24. 1910 a. Febr. 9. 1911). F. C. Raphael a. J. B. Sparks.

Digitized by Google

Daten über Drähte aus Kupfer, Aluminium & Spreealuminium.

	Kupfer	Aluminium	Spreealuminium
Spezifisches Gewicht . .	8,913	2,70	2,75-2,85
Verhältnis der spez. Gewichte	1	0,303	0,314
Wärmeausdehnungscoefficient für 100° C. . .	0,001869	0,002336	0,0022
Spezifische Wärme. . .	0,0930	0,2220 bei 0° 0,2320 „ 100° 0,2845 „ 625°	
Wärmeleitungsfähigkeit .	0,819 bei 0°	0,343 „ 0° 0,362 „ 100°	
Schmelzpunkt	1100	625°	650°
Leitungswiderstand in Ohm für 1^m u. 1^{mm^2} . . .	0,0162 bei 15° für reines Kupfer 0,0172 bei 15° C. für weiches Kupfer 0,0175 bei 15° C. für hartes Kupfer	0,0245 bei 0° C. Reinheit 99,66 % 0,02846 bei 0 % Reinheit 98,8 % 0,02874 bei 15° C. gebräuchlich	ca 0,034
Leitungsfähigkeit % bei 15° C.	57-58	34,8	
Verhältnis der Leitungsfähigkeiten	100	60-61	
Temperaturcoefficient für 1° C.	0,00402	0,00392 zwischen 0° & 27° C.	
Querschnitt } für gleiche	1	1,667	
Durchmesser } Leitfähigkeit	1	1,293	
Gewicht }	1	0,505	
Querschnitt } für gleiche	1	1,408	
Durchmesser } Erwärmung	1	1,187	
Gewicht }	1	0,428	
Zerreissfestigkeit $^{kg}/_{mm^2}$	38-44 (AEG 1909)	16-20 (AEG 1910)	26-35 (AEG 1910)
„ nach v. Möllendorff. .	45 (Hartkupfer)	18	30
„ technische Prüfanstalten des Schweiz. Electr. Vereins	33,8-47,8 (hart) 25,6-41,8 (halbhart) 21,8-26,1 (weich)		
„ Hobart (americanisches Fabrikat?)		19,0 (4,5 $^m/_m$ Φ) -26,0 (1,0 $^m/_m$ Φ)	
„ „ (englisches Fabrikat?)		15,2 (8,23 $^m/_m$ Φ) -22,5 (0,81 $^m/_m$ Φ)	
Elastizitätsmodulus . .	13000 (Hartk.)	6650-6750 (6500 v. Möllendorff)	7000 (v. Möllendorff)
Dehnung bis zur Elast. gr.	0,15 %	0,14-0,16 %	
„ bis zum Zerreissen . .	2-3,5 %	4-6 %	

Digitized by Google

Liste des principales installations électriques en aluminium

FAITES PAR LA SOCIÉTÉ ÉLECTRO-MÉTALLURGIQUE FRANÇAISE.

Énergie Électrique du Littoral Méditerranéen.
Sud-Électrique à Avignon.
Énergie Électrique du Centre.
Dauphiné-Centre.
Société des Lignes Électriques.
Énergie Électrique du Nord de la France.
C.ie des Chemins de Fer du Midi.
C.ie des Chemins de Fer du Nord.
C.ie du Métropolitain de Paris.
Établissements Meyzonnaier à Annonay (Ardèche).
C.ie Électrique de la Grosne à Châlons-sur-Saône.
Michelin & C.ie à Clermont-Ferrand.
Allard-Rousseau à Roubais.
Exposition de Nancy.
Faïencerie Keller-Guérin à Lunéville.
Mr. Martin à Mayet.
Mr. Lemarie-Delaitre à Flers.
Menier Frères à Noisiel.
Cartonneries de l'Isère à la Haye-Descartes.
Société Hydro-Électrique de Fure et Morge et de Vizille.
Marcel Vilgrain à Nancy.
Société des Ciments de Trouville (Meuse).
Mr. Faure à Garny.
Mrs. Bouchayer & Viallet à Grenoble.
Société Hydro-Électrique d'Eau d'Olle.
Usines Électriques Bergmann à Paris.
C.ie des Tramways suburbains de Nancy.
Société Électrique de l'Ouest.
Poudrerie Nationale de Vonges.
Société Normande de Gaz, d'Électricité et d'Eau à Trouville sur Mer.
Société Anonyme d'Électricité à Pont-à-Mousson.
Mr. Théophile Simon à Parguy-sur-Saulz.

Digitized by Google

Mr. Brissard à Clères.
C.ie des Mines du Bong-Miu (Tonkin).
Mines de Borralha (Portugal), 27, rue Laffitte, Paris.
Établissements J. J. Carnaud et Forges de Basse-Indre.
M.me V.ve Soquet Aîné à St.-Girons (Ariège).
Transport des forces de Rjukangos (Norvège).
Mr. Seigneur à St.-Soupplets.
Mr. Archambault à St.-Philibert sur Risle.
C.ie du Gaz de Besançon.
Mr. Marcel Journée à Paris.
École Municipale de Physique et de Chimie de la Ville de Paris.
Société Générale des Hauts-Fourneaux, Forges et Aciéries en Russie.

In Deutschland ausgeführte Alumin.-Leitungen.

	Jahr	Draht-Quantum
Durch die Aluminium Industrie A. G. geliefert:		
Henkels Elektric. Werke, Wilhelmshöhe bei Cassel	1904	1.200 Kg.
Grossh. Bad. Maschinen-Inspection, Karlsruhe . .	1907	342 „
Ed. Freytag, Deutschlissa	1907	344 „
Kgl. Pulverfabrik, Ingolstadt	1904/05	782 „
Durch die A. E. G. geliefert:		
Elektric. Werk an der Pleisse, Werdau	1909	10.400 „
„ „ an der Lungwitz, Ober Lungwitz.	1909	
20.67 Km. Hochspannungs-Leitung		10.000 Volt
		12.000 Kg.
13.8 „ Niederspannungs-Leitung		10.400 „
Elektric. Werk Ober-Erzgebirg, Schwarzenberg .	1909	
137 Km. blanke Leitungen		42.000 „
Hess. Nassauisch. Hüttenverein für Ueberland-Centrale, Oberscheld		30.000 „

Digitized by Google

Beispiele von Amerikanischen Kraftübertragungsanlagen

Ort oder Firma	Uebertragene Kraft P S	Länge d. Leitung km.	Spannung V
Snoqualmie Falls-Seattle	12.000	51	30.000
Snoqualmie Falls-Tacoma	12.000	70	30.000
Mokelumnie River & Stockton (Californien)	1.300	70	25.000
Tariffville-Hartford, Con.	2.000	53	10.000
Niagara Falls-Buffalo	15.000	35	22.000
Shawinigan Falls-Montreal (Canada)	10.000	136	50.000
Electric Power House-S. Francisco.	13.000	248	60.000
Colgate-Oakland (Californien)	15.000	230	40.000
Siskiyou Electric Power C°	1.000	100	22.500
Madison River-Butte (Mont.)	2.000	107	40.000
Chicago North Western Elevated Railway C° . . .	—	131	—
Edison Electric Illuminating C°	—	131	—
„ „ „ „	67.000	Längste Linie 40	7.000
Jackson Light & Power C°	—	—	—
Kalamazoo Valley Electric C° (Kalamazoo Mich.) .	—	—	—
Scioto Valley Pool (Valley Crossing Oh.)	—	—	—
Milwankee Electric Railway & Light C°, Wisconsin	—	—	—
Niagara, Lockport & Ontario Power C°, Niagara-Syracuse	—	260	—
Niagara Falls, Ontario-Buffalo	50.000	25	22.000
Carries Furnaces, Braddock, Homestead Steel Works	—	—	—

Digitized by Google

mit Aluminium-Leitern.

Leitungsquerschnitt bezw. Leitungsdurchmesser	Gewicht tons	Bemerkungen
6 Drähte à 6,6 mm. Φ	30	Spannweite 40-50 m. Seit 1901
6 „ à 5,8 „ „	32	„ „ „ „ „
4 „ à 7,4 „ „	—	„ 40 m.
Kabel 19 mm. Φ. 7 × 7 Drähte à 2,3 mm. Φ.		
3 Kabel à 3 Drähte	—	„ 35 m. bei Kupfer vorher 25 m. Seit 1901
3 „ à 7 „ à 4,1 mm. Φ	450	„ 33 m.
3 „ à 37 „ à 2,9 „ „	320	„ 39 m.
3 „ à 7 „	200	„ 39 m.
3 „		
Kabel bis 37 mm. Φ	70	
	133	Verbindung des Bostoner Werkes mit den Stationen.
	—	Verteilung von 10 Stationen an 18 Städte.
	24,5	
	14,5	
	37,5	
	42,5	
9 Kabel	—	Spannweite über den Niagara 180 m.
9 „	132	„ „ „ „ 660 m.
4 „	—	„ „ einen Fluss 300 m.

Digitized by Google

Beispiele von Französischen

Ort oder Firma	Uebertragene Kraft P S	Länge d. Leitung km.	Spannung V
Schneider & Cie. Creusot:			
Kraftübertragung in Champagne s/ Seine . . .	2.000	16 Kabel à 342 m.	500
Société Biterroise de Force & Lumière in Béziers:			
Linien nach Laurens, Roujan Pouzolles, Caux etc.	1.900	32	16.000
Énergie Électrique du Littoral Méditerranéen, Marseille:			
Linien: Entraigues-St. Maximin	4.000	27	30.000
Siagne-Entraigues	2.500	17	30.000
Gardannes-les Pennes	3.000	13	13.000
Rians-St. Maximin	8.000	30	50.000
Société des Chaux & Ciments de Trouville:			
Kraftübertragung in Trouville (Meuse)	60	8 Kabel à 150 m.	240
Cartonneries de l'Isère, Champ près Vizille:			
Kraftübertragung	600	6 Kabel à 600 m.	550
Société du Sud-Électrique, Avignon:			
Linien von Avignon nach Montpellier, Sorgues, Carpentras	1.000	100	13.500

Digitized by Google

Kraftübertragungsanlagen mit Aluminium-Leitern.

Leitungsdurchmesser bezw. Leitungsquerschnitt	Draht-Gewicht in Tonnen	Bemerkungen
144 mm². 37 Drähte à 2,25 mm. Φ	3	Spannweite 42 m. Bau 1903, Betrieb 1904.
Kabel 7 Drähte à 2,25 mm. Φ .	10	Spannweite 40 m. Betrieb 1905.
„ 7 „ à 1,8 „ „ .		
107 mm². 19 Drähte à 1,69 mm. Φ	30	Bau 1905/6, Sämtliche Linien sind im Betrieb.
69 „ 7 „ à 3,54 „ „	14	
107 „ 19 „ à 1,69 „ „	14	
107 „ 19 „ à 1,69 „ „	34	
200 mm² & 47 mm²	4	Bau & Betrieb 1908, Spannweite 75 m.
243 mm². 37 Drähte à 2,9 mm. Φ		Spannweite 33-40 & 50 m., Bau 1907, Betrieb 1908.
113 „ 19 „ à 2,75 „ „		
161 „ 37 „ a 2,35 „ „		
52 „ 19 „ à 1,87 „ „		
Kabel, Querschnitt 125 mm², 107, 104, 50, 20 & 17 mm².		Spannweite 50 & 60 m., Gegenwärtig im Bau.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Dès l'année 1904, au Congrès international de St-Louis, M. H. W. Buck démontrait qu'à l'égard de l'emploi de l'aluminium pour la construction des lignes électriques, la période d'expériences pouvait être considérée comme close, car le matériel offert était désormais d'une sûreté parfaite, et répondait de tous points à ce qu'on en pouvait attendre. D'autre part, en 1908, M. E. Dusaugey présentait à son tour au Congrès de Marseille un rapport dans lequel il dénonçait une répugnance, qui ne se bornait pas à la France, mais s'étendait à l'Europe entière, pour l'emploi de l'aluminium dans ce cas spécial.

L'Auteur s'est proposé de reprendre l'examen de cette question si importante pour l'industrie de production et pour celle de la consommation; il s'efforce de mettre au point les raisons qui conseillent l'emploi de l'aluminium pour les lignes électriques, et de réduire à leur juste valeur les objections qui ont été soulevées contre cet emploi. Il renvoie aux deux communications susnommées pour la partie mathématique du problème, et achève son travail par une bibliographie complète de l'argument.

Il constate tout d'abord que l'aluminium n'est entré que pour une très faible part dans la construction des machines et des transformateurs, et l'explique judicieusement par le fait que les conducteurs faits de ce métal doivent être nécessairement d'un volume supérieur à ceux en cuivre, et que des considérations d'économie et de rendement obligent la technique moderne à réduire au minimum les dimensions des machines. Il discute ensuite systématiquement les avantages et les inconvénients de l'emploi de l'aluminium dans la construction des lignes électriques, énumérant d'abord les considérations d'ordre général, et passant ensuite à celles qui sont directement subordonnées aux fonctions spéciales auxquelles certaines de ces lignes sont destinées.

Sur la coexistence dans une seule et même installation de lignes en aluminium et en cuivre, l'Auteur observe que, si elle trouble l'unité de système de ces installations, elle ne nuit en aucune façon ni à la régularité de leur fonctionnement, ni à leur esthétique; en certains cas, les dimensions forcément plus grandes des conducteurs en aluminium,

Digitized by Google

augmentant la capacité, peuvent constituer un avantage. L'objection relative à l'unité de système n'a aucune valeur dans les cas où les avantages offerts par l'emploi de l'aluminium dépassent les légers inconvénients de la complication qu'il entraîne. Ces inconvénients peuvent devenir très réels dans le cas où les mêmes personnes sont chargées à la fois de la construction des lignes en cuivre et de celles en aluminium, car les deux qualités de matériaux demandent un traitement et des précautions très différents. L'objection que la promiscuité des lignes oblige à de plus grandes réserves dans les magasins n'a point d'importance, car il est toujours facile d'établir a priori *ce qu'il faut de l'un et de l'autre matériel avec une précision suffisante.*

On rencontrerait une difficulté sérieuse si l'on s'avisait de vouloir souder les uns avec les autres des conducteurs de cuivre et d'aluminium; jusqu'à ce jour, on n'a encore pas trouvé le moyen de souder convenablement l'aluminium, et presque toutes les jonctions d'aluminium avec aluminium ou d'aluminium avec cuivre doivent se faire au moyen d'organes mécaniques; dans le cas de métaux différents, il faut avoir grand soin d'exclure toute trace d'humidité au moyen de vernis et de bandages isolants partout où les métaux sont en contact direct.

En ce qui concerne l'économie relative de l'un ou de l'autre système, elle dépend du rapport qui existe entre la conductivité et la densité des deux métaux. Selon Möllendorf, à la fin de 1910, à parité de prix par unité de longueur, une résistance donnée aurait coûté, en aluminium, 1.92 fois la même en cuivre, et 2.2 fois, si l'on eût tenu compte de l'échauffement; mais le poids de métal employé n'aurait été, pour l'aluminium, qu'environ $^1/_{3.6}$ *de celui du cuivre. Or, à l'époque considérée, le rapport des prix unitaires des deux métaux était comme 1* (Cu) *à 1.10* (Al) *et laissait une marge suffisante pour couvrir le surplus de coût de la mise en œuvre de l'aluminium; l'emploi de ce dernier métal eût toujours réalisé environ 30 °/₀ d'économie sur celui du cuivre.*

En dépit de cet avantage évident, l'emploi du cuivre l'emporte de beaucoup sur celui de l'aluminium; cela dépend sans doute, en partie, des habitudes invétérées chez les consommateurs, et aussi de l'idée répandue qu'il est plus facile de récupérer la valeur du métal non employé ou des déchets de démontage quand il s'agit du cuivre, que lorsque c'est l'aluminium qu'on a choisi; à cet état de choses, le seul remède est l'extension graduelle de l'emploi de l'aluminium, et la plus grande familiarité qu'on prendra de son usage.

Pendant les dix dernières années les variations de prix de l'aluminium n'ont jamais dépassé celles du cuivre; le danger de rupture n'a pas été plus fréquent dans le premier que dans le second de ces métaux, et tous

Digitized by Google

deux offrent sensiblement les mêmes coefficients de garanties à ceux qui s'en sont servis.

En ce qui regarde l'emploi de l'aluminium, il est évident que des règles spéciales sont à observer pour le montage, et il serait certainement désirable que ceux qui fabriquent ce métal en Europe prissent l'initiative d'imiter leurs confrères d'Amérique, et s'offrissent à entreprendre le montage des grandes lignes sous leur propre garantie.

On objecte à l'emploi de l'aluminium pour les lignes en fil nu le danger de corrosion sous l'influence de l'humidité atmosphérique et d'autres vapeurs spéciales; mais des années d'expérience n'ont pas montré qu'à cet égard le cuivre eût moins à souffrir que l'aluminium; dans le voisinage de la mer, il semblerait que ce dernier métal résiste mieux que l'autre aux exhalaisons salines; l'hydrogène sulfuré, l'acide sulfurique dilué, l'ammoniaque et les acides organiques n'ont qu'une action très limitée sur l'aluminium; on a observé qu'exposé à l'air, il se recouvre rapidement d'une mince couche d'oxyde, très résistante, qui rend ce métal si difficile à souder, mais qui protège à merveille ses couches inférieures contre tous les agents corrosifs du dehors. L'A. ne considère pas cette difficulté de souder l'aluminium comme un très grand inconvénient, car il est d'avis que même pour le cuivre la jointure mécanique est préférable à la soudure des lignes importantes; cette dernière opération ne peut guère être considérée que comme un utile complément d'une jointure mécanique, mais non pas la remplacer. Des différences insignifiantes ont été constatées à l'égard de la condensation superficielle de la vapeur d'eau, et des dépôts consécutifs sur les fils d'eau et de glace, dus à l'absorption de la chaleur par ces fils à la suite de variations rapides de leur température.

L'aluminium ne convient pas aux lignes nues enfouies dans le sol, où, en présence de l'humidité, l'action électrolytique le corrode. Il s'adapte très bien au contraire à la construction de lignes aériennes soutenues par des poteaux, ou à celle de conducteurs du genre des barres omnibus ou des pièces métalliques qui les réunissent avec les machines, etc., car il possède une rigidité remarquable. Pour la dilatation, les deux métaux se comportent à peu près de même, bien que le coefficient de l'aluminium soit plus élevé que celui du cuivre, parce que, la superficie extérieure étant nécessairement plus grande dans le cas de l'aluminium, sa température reste plus basse, à parité d'énergie dissipée.

L'aluminium, pour des portées égales entre deux points d'appui, se trouve dans des conditions plus favorables que le cuivre, car le rapport entre le poids spécifique et la charge de rupture est moindre pour lui; une composition connue sous le nom de spreealuminium *a récemment fait son apparition sur les marchés, qui, à cet égard, se trouve encore*

Digitized by Google

dans de meilleures conditions que l'aluminium et coûte un peu plus cher que ce dernier; c'est vraisemblablement un alliage qui contient une faible quantité de cuivre, mais qui offre encore à l'emploi une économie d'environ 7 $^0/_0$ sur le cuivre.

L'aluminium montre une fâcheuse disposition à la rupture, qui dépasse celle du cuivre, et qui semble devoir s'attribuer aux vibrations des supports; c'est pour obvier à cet inconvénient que les américains donnent généralement la préférence aux lignes cordées. Dans certains cas, le moindre poids spécifique de l'aluminium contribue à diminuer les frais de pose, et l'Auteur décrit quelques modalités intéressantes. Il va de soi que sur des fils de plus forts diamètres les dépôts éventuels de glace et de neige sont plus volumineux; aussi faut-il leur donner, à la température ordinaire, une flèche, entre les supports, plus grande qu'aux fils de cuivre, de sorte que pendant la saison froide les surcharges les plus fortes n'arrivent jamais à dépasser la charge de sûreté préétablie.

A parité de résistance, le moindre poids de l'aluminium le rend fort avantageux en ce qui concerne les supports; toutefois le plus grand écartement qu'une flèche plus longue oblige à donner aux isolateurs nécessite souvent une augmentation de la hauteur des poteaux; il en résulte aussi une self-induction légèrement plus forte, dont pourtant les effets sont généralement compensés par la capacité plus grande.

Dans tous les cas où une longueur exceptionnelle des portées est imposée, et où le développement en hauteur des poteaux est limité au point qu'il est impossible de donner aux flèches une longueur suffisante, l'emploi du cuivre ou du bronze s'impose; le Spreealuminium, déjà nommé, peut pourtant lutter avantageusement avec eux. On peut encore recourir à l'emploi de fils composés, dont l'âme est constituée par un fil d'acier et la partie extérieure d'aluminium; on en a fait pendant quelque temps en Amérique; mieux encore: une corde d'aluminium ayant à son centre un fil d'acier parfaitement garanti contre les agents oxydants par l'enveloppement presque complet des fils qui l'entourent.

L'Auteur considère à la fin de son rapport le cas de lignes isolées, pour lesquelles le volume plus grand de l'aluminium entraîne à de plus grands frais pour l'isolement et pour l'armature dont il faut éventuellement recouvrir l'isolant. Il conclut en disant que, pour chaque type de ligne, il existe une certaine dimension au delà de laquelle l'emploi du cuivre devient plus économique.

Dans les installations de distribution à lignes isolées, la valeur de l'isolant prend une telle importance par rapport à celle du métal, que l'aluminium n'offre plus aucun intérêt, sauf dans les cas où il devient difficile de lutter contre l'échauffement. Pour les câbles destinés aux ten-

Digitized by Google

sions élevées l'aluminium devient avantageux en ce sens, qu'à potentiels égaux le plus grand diamètre du câble en aluminium sert à diminuer le travail du diélectrique. Là où la ligne n'a à subir aucun effort de traction il est loisible de recourir à quelque procédé de soudure pour les jointures.

La technique des courants de faible tension n'a point encore à considérer l'emploi de l'aluminium pour ses lignes, car les plus petites sections commerciales des fils sont encore exagérées pour les besoins de la télégraphie et de la téléphonie; en outre, une plus grande distance entre les fils de ligne compliquerait excessivement la question des supports, tandis que, d'autre part, une plus grande superficie de ces mêmes fils augmenterait sans avantage réciproque la pression du vent.

L'Auteur termine en résumant ses conclusions de la façon suivante:

1. — Les conducteurs en aluminium doivent être traités suivant les qualités charactéristiques de l'aluminium; ce traitement est différent de celui du cuivre; il n'est pas plus difficile; il a été arrêté en une technique et un procédé définis.

2. — L'existence simultanée dans une même exploitation de lignes en aluminium et de lignes en cuivre ne constitue pas un défaut d'homogénéité préjudiciable.

3. — Aux prix actuels de l'aluminium et du cuivre l'emploi de l'aluminium rend possibles des économies considérables, telles que la pratique doit forcément les considérer et en faire usage.

4. — Les économies sont particulièrement importantes dans le cas de conducteurs nus (barres omnibus etc.); viennent ensuite les lignes à fortes sections et à portées modérées (feeders de tramways etc.); puis les lignes de transmission à grande distance, notamment avec sections de 100 mm² et plus par fil ou phase, et enfin les câbles isolés, notamment ceux à un seul conducteur et à isolant autre que le caoutchouc.

5. — Comme conducteur du courant électrique l'aluminium ne présente que des avantages comparé au cuivre.

6. — Dans les cas de canalisation intérieure l'emploi de l'aluminium ne présente pas, en général, des économies remarquables.

7. — Pour les lignes à faible courant (téléphones et télégraphes) l'aluminium ne semble pas être applicable pour des raisons mécaniques.

8. — Pour les conducteurs nus, couchés dans le sol, l'aluminium n'est pas applicable pour des raisons chimiques.

Digitized by Google

Ueberspannungsschutz bei Freileitungs-, insbesondere Hänge-Isolatoren.

Dr.-Ing. W. Weicker (Hermsdorf S.-A.).

Die Gefahr der Ueberspannungen spielt auch für Freileitungs-Isolatoren eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die deshalb bisweilen gestellte Forderung, der Isolator müsse so gross sein, oder eine solche Form besitzen, dass unter allen Umständen Ueberschläge aussen um die Mäntel ausgeschlossen seien, ist teils praktisch oftmals überhaupt undurchführbar, teils muss sie geradezu als widersinnig bezeichnet werden. Denn auf diese Weise begibt man sich selbst des Schutzes, der in dem Isolator als natürliche Sicherheitsfunkenstrecke liegt. Freilich ist dabei Bedingung, dass der Isolator sicher eher *über-* als *durch*schlägt. Aus diesem Grunde kann eine nicht allzu hohe Ueberschlagsspannung geradezu erwünscht sein, während andererseits natürlich das Isolations-Vermögen des Isolators bei der normalen Betriebsspannung noch völlig ausreichend sein muss.

Es entsteht so die Aufgabe, Isolatoren zu schaffen, die bei verhältnismässig niedriger Ueberschlagsspannung doch im normalen Betrieb durchaus zuverlässig isolieren, bei eintretenden Ueberschlägen aber selbst keinen Schaden nehmen. Denn bei Ueberschlägen aussen um den Isolator kann der dadurch eingeleitete Lichtbogen bei der meist grossen Leistung unserer heutigen Kraftwerke seinerseits verheerend wirken; ist doch die

Digitized by Google

Hitzewirkung, die ein kräftiger Lichtbogen besitzt, so gross, dass davon in kurzer Zeit der beste Isolator zerstört werden kann.

Erfahrungsgemäss springt dabei zuerst stets die Hülse, d. h. die unterste Glocke des Isolators, da der nach der Stütze zu übergehende Lichtbogen hier seinen natürlichen Stützpunkt findet, und sich in dem inneren Hohlraum der Hülse gewissermassen verfängt; dann folgt der nächste Mantel und endlich kann, wenn nicht inzwischen die Maximalstreckenausschalter in Tätigkeit getreten sind, auch der oberste Mantel zerstört werden.

Einen wirksamen Schutz hiergegen hat Nicholson (1) empfohlen, nämlich einen ausserhalb der unteren Hülse angeordneten metallischen Schutzring. Nach diesem springt, wie Abb. 1 zeigt, der Lichtbogen von der besonders stark gefährdeten Hülse über, und bewahrt somit wenigstens diese sicher vor Zerstörung.

Der dadurch geschaffene Schutz ist nach Nicholsons Bericht über die Erfahrungen des Jahres 1910 (2) ganz wesentlich. Die Störungen durch Lichtbogenbildung sind dadurch auf ein äusserst geringes Mass herabgesetzt.

Um auch den oberen Mantel zu schützen, empfiehlt es sich, auch um ihn, wie dies bereits von Nicholson vorgesehen war, einen Schutzring zu legen, der jedoch dann zweckmässig etwas grösser, als der obere Porzellanmantel sein muss (Abb. 2).

Da jedoch in diesem Falle der obere Porzellanmantel lediglich als Regenschutzdach für die darunter befindlichen anderen Isolatormäntel dient, kann man ihn und den oberen Schutzring nach einem Patent der Porzellanfabrik Hermsdorf überhaupt besser durch einen Metallmantel ersetzen, zumal dieser dann leicht eine grössere Ausladung erhalten kann, und somit einen besseren Regenschutz gewährt.

Zusammen mit dem darunter angeordneten Schutzring bildet ein solcher Isolator, wenn der obere Schirm aus genügend festem Material besteht, einen ausserordentlich wirksamen Schutz gegen Entladungen zwischen Leitung und Erde, ohne dass die Porzellanteile des Isolators überhaupt dabei berührt werden würden. Die diesem Isolator weiter eigentümliche besonders gleichmässige

---

(1) Nicholson, " Proceedings of the Am. Inst. of El. Engineers „, 1910, Vol. XXIX, Seite 241.

(2) " Electrical World „. 23. März 1911, Seite 727.

Digitized by Google

Feldverteilung ist übrigens auch für den Porzellan-Isolator selbst von Vorteil, insofern dadurch die dielektrische Beanspruchung günstiger, die Durchschlagsfestigkeit also höher wird.

Derartige Isolatoren sind beispielsweise in der mit 60000 Volt betriebenen Speiseleitung der Bahnstrecke Dessau-Bitterfeld in Gebrauch. Doch auch in Anlagen mit Spannungen bis zu 10000 Volt, die sonst viel durch Zertrümmerung infolge von atmosphärischen Entladungen zu leiden hatten, sind diese Metallschirm-Isolatoren mit Schutzring mit Erfolg verwendet worden.

Auch für Hänge-Isolatoren hat bereits Nicholson in seiner oben erwähnten Arbeit auf die Möglichkeit der Verwendung von Schutzringen hingewiesen, dafür aber nur je einen einzigen Ring am oberen und unteren Isolatorende vorgesehen. Zweckmässiger dürften an *jedem* einzelnen Isolator, ein oder je nach der Formgebung auch zwei Schutzringe angebracht werden. Abb. 3 veranschaulicht beispielsweise die Verwendung der Schutzringe für einen *flach* gebauten Isolator, Abb. 4 dagegen für einen *höher* gebauten Isolator, bei dem zwei Schutzringe für jeden Isolator empfehlenswert sind, um eine sichere Ablenkung der Entladungen von den Porzellanteilen zu erzielen. Ein gewisser Vorteil dieser Konstruktion gegenüber den später zu beschreibenden Konstruktionen besteht darin, dass diese Schutzringe unter Umständen erst nachträglich aufgebracht werden können, wenn sich im Betrieb die Notwendigkeit eines solchen Schutzes herausstellt. Allerdings bieten diese Ringe eine einladende Sitzgelegenheit für Vögel, wodurch ev. vorübergehende Erdschlüsse verursacht werden können.

Bei allen derartigen Konstruktionen ist es doch nicht ganz ausgeschlossen, dass bei vollständiger Benetzung der Porzellanmäntel, besonders wenn diese durch vorangegangene Schmutz- oder Salzablagerung etwas leitend geworden sind, anfänglich doch ein Stromübergang längs der Mäntel stattfinden, und diese evtl. unzulässig erwärmen könnte. Dies ist bei *Metallschirm-Hänge-Isolatoren* so gut wie ausgeschlossen.

Eine derartige Ausführung, bei der einfach der obere Porzellanmantel durch einen Metallmantel ersetzt ist, zeigt Abb. 5.

Bei dem verhältnismässig grossen Abstand der einzelnen Metallschirme werden indessen Entladungen noch nicht unbedingt von Metallschirm zu Metallschirm überschlagen. Um dies sicher zu erreichen, müsste entweder doch noch je ein besonderer Schutzring vorgesehen, oder die Metallmäntel müssten noch

Digitized by Google

näher aneinandergerückt werden, was jedoch der verhältnismässig hohe Kopf dieser Isolatoren verhindert.

Ein weiterer Fortschritt bedeutet daher die Konstruktion des in Abb. 6 dargestellten Isolators, bei dem nach einer Ausführung der Porzellanfabrik Hermsdorf S.-A., die Kappe des Isolators vollständig in das Porzellan eingelassen ist. Hier lassen sich die Einzelglieder leicht so dicht hängen, dass mit Sicherheit eher ein Ueberschlagen zwischen den einzelnen Mänteln, als nach dem Porzellan zu erfolgt. Sogar ohne Metallmäntel findet bei diesem Isolator für geringen Abstand der einzelnen Glieder ein direkter Funkenüberschlag vom Aufhängepunkt nach dem Leitungsdraht über alle Isolatoren hinweg statt. Ausserdem erhält, wie nebenbei bemerkt sei, dieser Isolator durch die eigenartige Anordnung der Kappe eine ausserordentlich grosse mechanische Festigkeit.

Immerhin ist auch selbst bei Verwendung des flachen Metallschirmes das Porzellan noch äusseren Einflüssen, seitlichem Regen und mechanischen Beschädigungen, wenn auch in geringem Masse ausgesetzt. Um auch nach dieser Richtung völlige Sicherheit zu erreichen, kann man den eigentlichen Isolator durch Wölbung des Schirmes, oder flache Formgebung der Porzellanteile, fast ganz oder auch vollkommen hinter dem ausladenden Metallschirm zurücktreten lassen, wie dies in Abb. 7, 8 und 9 veranschaulicht ist. Man erhält dadurch gewissermassen einen " gepanzerten „ Isolator und zwar nicht nur inbezug auf äussere mechanische Beschädigungen, sondern auch in elektrischer Beziehung durch die Sicherheitsfunkenstrecke, welche die einzelnen Metallschirme für den eigentlichen Isolator bilden. Hierdurch ist zunächst jede Gefahr der Hitzewirkung eines etwaigen Lichtbogens für die Porzellanteile des Isolators ausgeschlossen und sodann erfolgen Entladungen zwischen den einzelnen Metallmänteln je zweier Isolatoren bei weit niedrigerer Spannung, als die Prüfspannung des einzelnen Isolators beträgt. Infolgedessen ist auch die Durchschlagsgefahr des Isolators stark vermindert.

Mit Bezug hierauf seien noch einige besondere Bemerkungen über das elektrische Verhalten derartiger Isolatoren bei Ueberspannungen gemacht: Es mag vorerst noch fraglich sein, ob die Ueberschlagskurve dieser Zwischen-Elektroden, als welche natürlich die Metallschirme der einzelnen Isolatoren aufzufassen sind, wesentlich gegenüber der für gewöhnliche Isolatoren gilti-

Digitized by Google

gen Kurve abweicht, und sodann, wie sich die Ueberschlagsverhältnisse bei Regen gestalten.

In dieser Beziehung ist zunächst die grössere Regelmässigkeit der Ueberschlagskurve bei der Verwendung von Metall-Zwischen-Elektroden hervorzuheben.

Die Kurve (Ueberschlagsspannung in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand, d. h. der kürzesten Entfernung zwischen den einzelnen Metallschirmen) zeigt einen durchaus linearen Charakter, und da sie fast durch den Koordinaten-Nullpunkt geht, ist die Ueberschlagsspannung ziemlich genau proportional der Gliederzahl. Dies trifft bei anderen Isolatorformen höchstens bei Regen zu, während im trockenen Zustande oft recht unregelmässige Spannungswerte erhalten werden. Es hängt dies damit zusammen, dass erst durch die sich an den Mantelrändern ansetzenden Regentropfen Büschelentladungen, und damit ein regelmässiger Verlauf der Funkenspannung (nämlich als Büschelgrenzspannung) eingeleitet wird. Im anderen Falle (nämlich als Anfangs- oder Glimmgrenzspannung am trockenen Isolator) zeigt die Funkenspannung erfahrungsgemäss oft erhebliche Unregelmässigkeiten.

Infolgedessen weicht die Ueberschlagsspannung gewöhnlicher Hänge-Isolatoren in trockenem Zustande und bei Regen in der Regel ziemlich stark ab (bis zu 40 %), was im allgemeinen nicht erwünscht ist. Auch setzt die Benetzung der unteren Isolator-*mäntel* naturgemäss die Ueberschlagsspannung wesentlich herab, sodass die Ueberschlagsspannung je nach Stärke und Richtung des Regens usw. ziemlichen Schwankungen unterworfen sein kann (1).

Günstiger verhalten sich nach dieser Richtung bereits Schutzring-Isolatoren, weil bei diesen wenigstens der letztere Umstand wegfällt. Hier stimmen die Ueberschlagswerte trocken und bei Regen bereits bis auf etwa 20 % überein.

Bei Metallschirm-Hänge-Isolatoren der in den letzten Abbildungen dargestellten Form dagegen ist der Unterschied bis auf etwa 12 bis 15 % (bei starkem Regen) herabgemindert. Eine weitere Abnahme der Ueberschlagsspannung ist dagegen, selbst unter den ungünstigsten Witterungsverhältnissen, z. B. für ganz

---

(1) WEICKER, " Die Prüfung von Hochspannungs-Freileitungs-Isolatoren inbezug auf Entladungserscheinungen „, E. T. Z., 1910, 8. 744.

Digitized by Google

horizontal einfallenden feuchten Schnee, der erfahrungsgemäss das Isolationsvermögen gewöhnlicher Isolatoren besonders stark herabsetzen kann, gänzlich ausgeschlossen, weil die isolierenden Porzellanteile vollkommen durch den vorgezogenen Metallschirm gedeckt sind.

Erinnert sei bei dieser Gelegenheit an eine ähnlich gestaltete, von Reynders beschriebene Kondensator-Ausführungsklemme (1), die übrigens auch inbezug auf die Unterteilung der Gesamtkapacität in eine Anzahl in Reihe geschaltete Einzel-Kondensatoren, entsprechend den Einzelgliedern von Hänge-Isolatoren, diesen ähneln. Auch bei dieser Klemme hat man durch Ueberschieben von metallischen Hauben den Isolationsweg zwischen den einzelnen leitenden Schichten der Durchführung gegen Benetzung geschützt und dadurch erreicht, dass derartige Durchführungen sogar im Freien verwendet werden können.

Es könnte gegen all diese Metall-Konstruktionen noch der Vorwurf der ungenügenden Wetterbeständigkeit, sowie der ev. Verbrennung durch Lichtbögen, sowie endlich der zu grossen Kosten erhoben werden. Was den letzteren Einwand anbelangt, so treten im allgemeinen die Kosten der Isolatoren bei den jetzt gebräuchlichen grossen Spannweiten gegenüber den sonstigen Kosten der Fernleitung (2) so zurück, dass auch die geringe Preiserhöhung, den grosse Metallschirme bedingen, gegenüber den dadurch erzielten Vorteilen wohl kaum in Betracht kommen.

Gegen den Einwand der Zerstörung durch Lichtbogenbildung ist hervorzuheben, dass eine Zerstörung eines oder mehrerer Metallschirme noch lange keine Betriebsstörung bedeutet, da ja die eigentlichen Porzellan-Isolatoren hiervon unberührt bleiben und insbesondere die Durchschlagssicherheit der Isolatoren hiervon ganz unabhängig ist.

Was endlich die Wetterbeständigkeit der Metallschirme anlangt, so ist kein Grund vorhanden, dass die Schirme, wenn aus starkem, gut verzinkten Eisenblech hergestellt, weniger haltbar als die übrigen verzinkten eisernen Armaturteile sein sollen.

Zusammengefasst sind die Vorzüge dieser Hänge-Isolator-Konstruktion die folgenden:

---

(1) Reynders, " Proc. of the Am. Inst. of El. Eng. „, März 1909, S. 243.

(2) Marchant & Watson, " Journal of the Institution of Electrical Engineers „, April 1910, S. 438.

Digitized by Google

Nahezu gleichhohe Ueberschlagsspannung in trockenem Zustande und bei Regen, wegen des durch die gewölbten Metallschirme bedingten vollkommenen Regenschutzes, weshalb nur eine geringere Zahl von Einzelgliedern als bei anderen Typen vorgesehen zu werden braucht; fast völlige Bruchsicherheit gegen Steinwürfe und bei der Montage; Sicherheit des Porzellan-Isolators gegen die Hitzewirkung etwaiger Lichtbogenbildung, durch die von den Metallmänteln gebildete Sicherheitsfunkenstrecke; grosse Durchschlagssicherheit infolge der im Verhältnis zur Prüfspannung des Isolators niedrigen Ueberschlagsspannung; günstige dielektrische Beanspruchung des Porzellanmaterials im Kopf, besonders gegenüber Hänge-Isolatoren der Kettenglied-Type, durchaus gleichmässige Feldverteilung zwischen den einzelnen Metallmänteln, und endlich ziemlich genau proportionale Spannungszunahme mit der Zahl der Glieder.

All diese Eingenschaften dürften den beschriebenen Isolator namentlich dort geeignet erscheinen lassen, wo weniger auf äusserste Billigkeit, als auf unbedingte Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit, der Hauptwert gelegt werden muss.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Il est notoire que les surtensions constituent un danger considérable pour les isolateurs qui soutiennent les lignes aériennes, et que ceux-ci sont menacés, en outre, par les arcs et les décharges dus à d'autres causes éventuelles, le danger provenant alors de l'effet calorifique excessif qui se manifeste à la surface des isolateurs.

Nicholson a conseillé, comme protection efficace contre ce genre de danger, de munir l'isolateur d'un anneau métallique placé au-dessous de la cloche inférieure. On augmente considérablement l'effet protecteur lorsque, suivant le brevet de la Porzellanfabrik, Hermsdorf, S. A., on remplace la cloche supérieure par un chapeau métallique. Alors l'étincelle jaillit ou l'arc se forme entre le chapeau métallique et la garniture de l'anneau, c'est-à-dire entre deux électrodes métalliques, et laisse la porcelaine indemne.

Ce système s'applique aussi, avec facilité, aux isolateurs suspendus.

Ainsi que diverses illustrations le montrent, ces sortes de chapeaux sont construits de façon que les décharges n'aient lieu qu'entre les pièces métalliques, et que la porcelaine des isolateurs à protéger soit complètement garantie contre tout dommage de nature électrique et même mécanique. De plus, ces écrans, qui prennent la forme de calottes, recouvrent la porcelaine et l'abritent contre la pluie; par conséquent, l'isolateur n'étant pas mouillé par la pluie, sa tension de décharge n'est que très peu inférieure à celle du temps sec. De ce côté encore, l'isolateur ainsi protégé offre de plus grandes garanties de continuité du service.

On peut ajouter, enfin, que le système de protection préconisé s'étend aussi à la perforation, car la tension de décharge entre les deux pièces métalliques est de beaucoup inférieure à celle appliquée aux essais des cloches avant leur montage. De plus, la distribution uniforme du champ dans les isolateurs munis d'un chapeau métallique est un avantage appréciable.

Digitized by Google

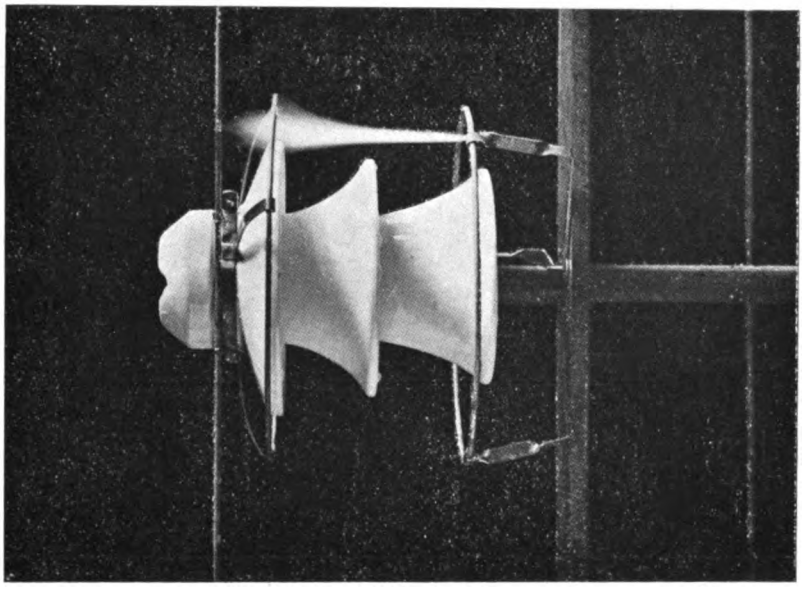


Abb. 2.

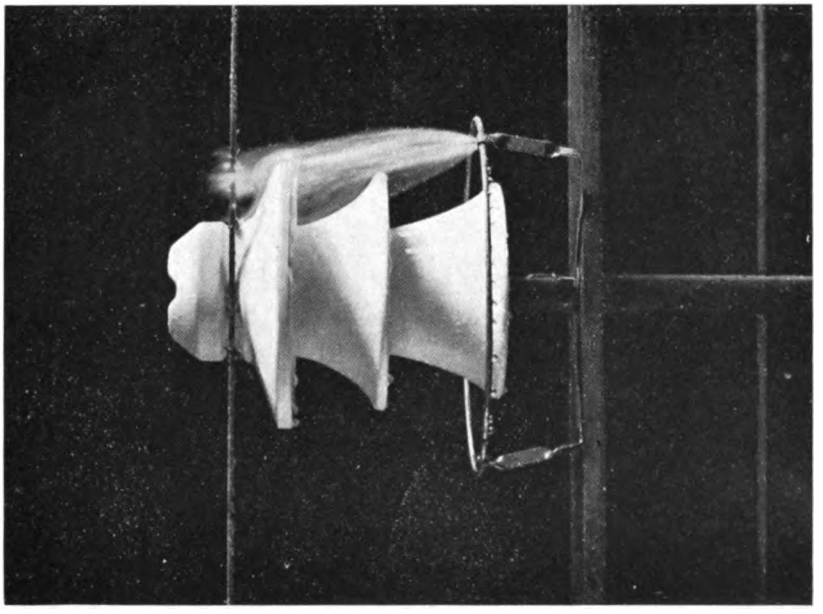


Abb. 1.

Digitized by Google

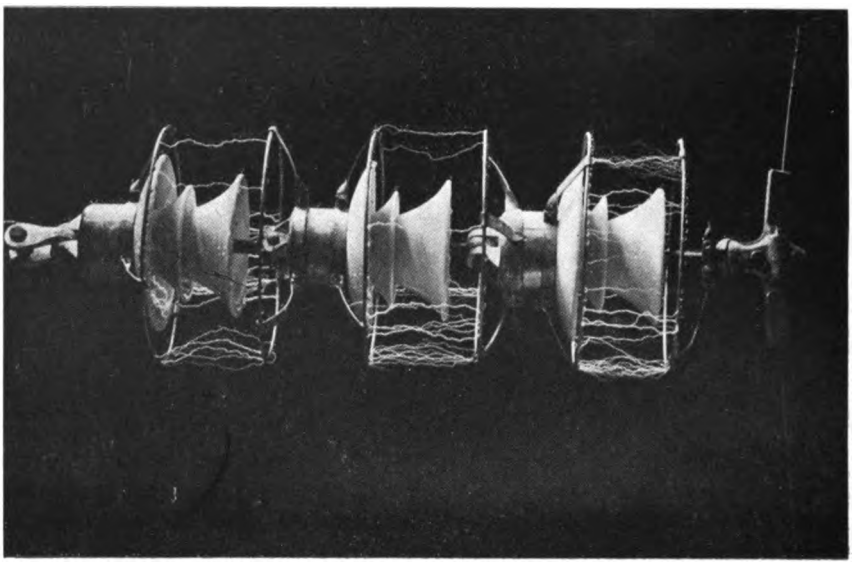


Abb. 4.

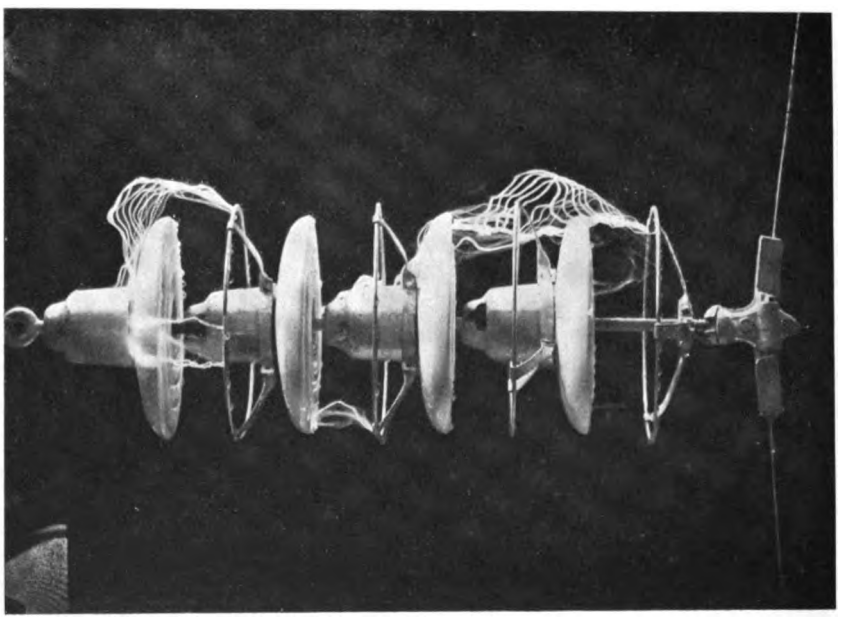


Abb. 3.

Digitized by Google

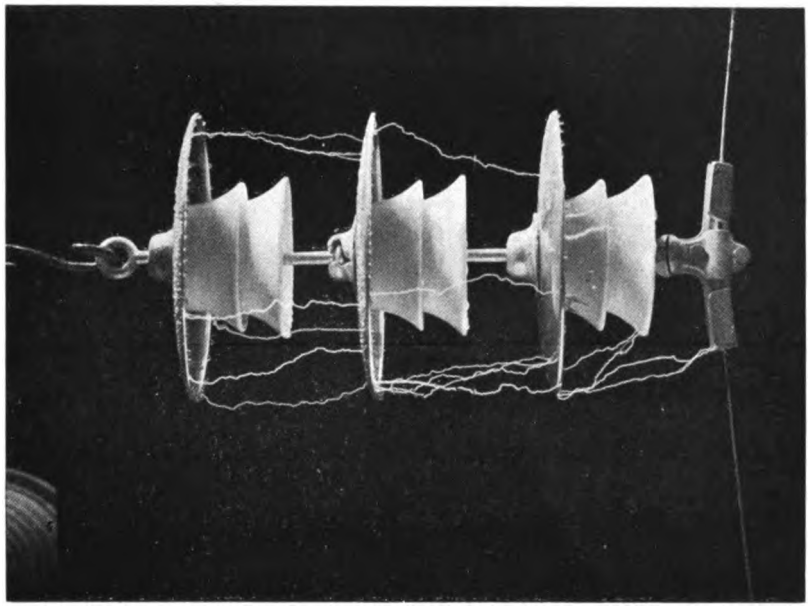


Abb. 6.

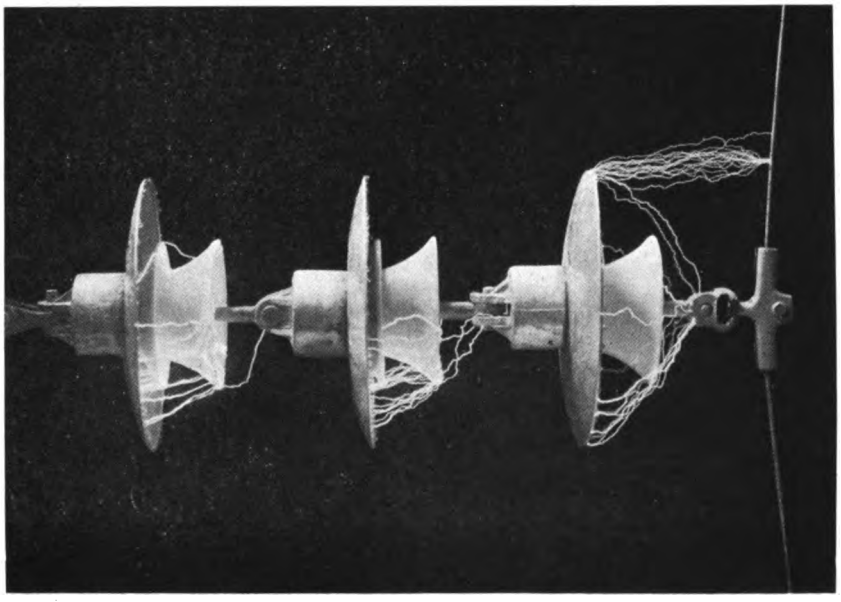


Abb. 5.

Digitized by Google

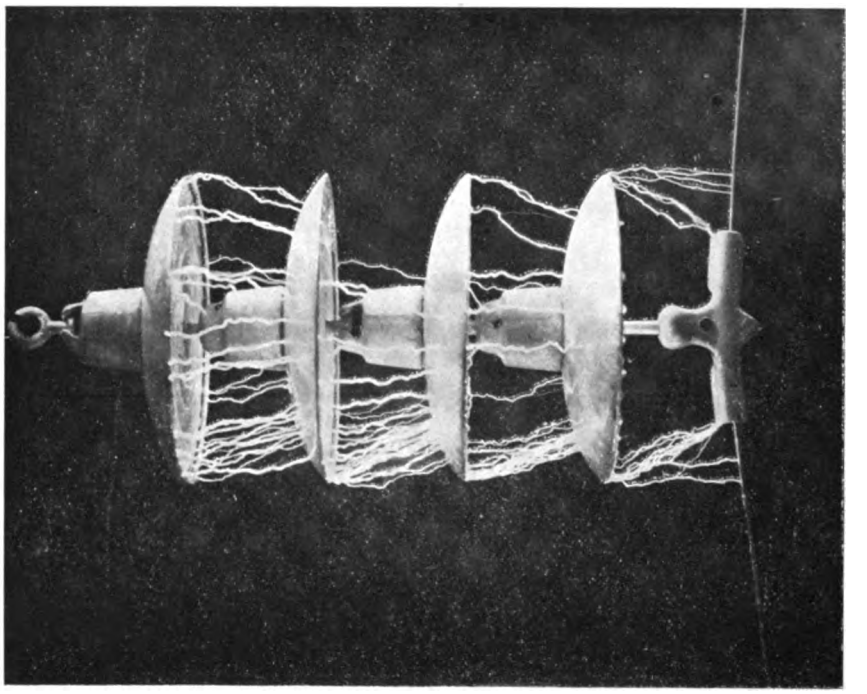


Abb. 8.

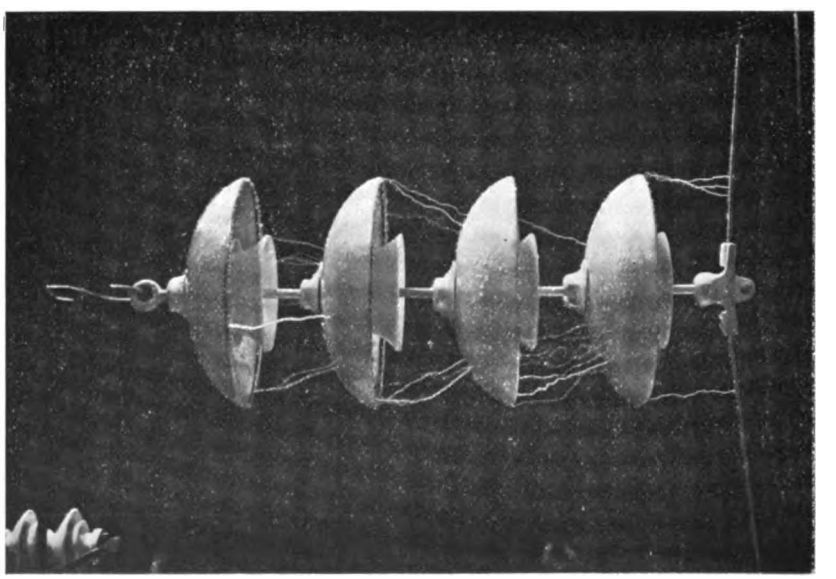


Abb. 7.

Digitized by Google

Abb. 9.

Digitized by Google

Digitized by Google

Rapport sur les réseaux souterrains à haute tension reliés métalliquement aux lignes aériennes.

Rapporto sul Tema N. 5 del Congresso.

Relatore M. J. GROSSELIN (Paris).

La question posée par le Comité du Congrès se réfère à un cas plutôt rare, si l'on entend, par hautes tensions, les tensions supérieures à 25.000 volts.

La tension des lignes aériennes est, en effet, presque toujours abaissée par l'intermédiaire de transformateurs avant de pénétrer dans les réseaux de distribution.

Mais, beaucoup plus souvent, une ligne aérienne à très haute tension traverse, en câble souterrain, une voie ou une localité habitée.

Les divers problèmes à résoudre sont d'ailleurs à peu près identiques dans les deux cas, et nous les examinerons en même temps.

Nous nous poserons les questions suivantes:

1. — L'industrie est-elle en état de livrer des câbles capables de supporter les tensions actuellement employées sur les lignes aériennes?

2. — A quelles tensions convient-il d'essayer ces câbles?

Digitized by Google

3. — A-t-on reconnu l'existence de dangers spéciaux pour les câbles reliés métalliquement aux lignes aériennes ?

4. — Quelles sont les précautions prises pour parer à ces dangers ?

1. — Tensions maxima d'emploi.

En Norvège, la ligne aérienne passant, en tunnel, de Tysse à Odda, fonctionne à 120.000 volts.

En Amérique, on emploie des tensions de 110.000 à 120.000 volts sur les lignes aériennes.

Sur le Continent, les tensions de 60 à 70.000 volts deviennent courantes sur ces mêmes lignes.

D'autre part, on a réalisé, à titre d'essai, et notamment pour l'Exposition de Turin, des câbles souterrains à conducteurs multiples capables de fonctionner à 100.000 volts, mais, à notre connaissance, on n'a pas encore fait fonctionner de câbles en service industriel, à des tensions supérieures à 40.000 volts en alternatif avec conducteurs multiples et à 50.000 volts en continu (1).

Toutefois, très prochainement, la C.ie Lorraine d'Électricité mettra en charge, en les reliant directement à une ligne de transport à 65.000 volts, deux à trois kilomètres de câbles souterrains à 3 conducteurs.

On trouvera, dans le tableau ci-annexé, quelques renseignements qui nous ont été obligeamment communiqués sur les lignes mixtes à liaison directe.

En somme, les plus récentes expériences des constructeurs de câbles paraissent établir qu'ils peuvent livrer, en toute sécurité, des câbles fonctionnant:

en courant continu (1 conducteur) . . . . à 100.000 volts
en courant alternatif (conducteurs multiples) à 50.000 volts.

Peut-on monter plus haut ?
Cela dépend du coefficient de sécurité que l'on exigera.

---

(1) Les Maisons Siemens Halske et Felton et Guilleaume ont récemment posé, entre Muldonstein et Bitterfeld (8.600 m.), chacune une canalisation en câbles à un conducteur fonctionnant à 60.000 volts.

Digitized by Google

2. — Tensions d'essais en usine et après pose.

Coefficient de sécurité. — Nous désignerons par coefficient de sécurité le rapport entre la tension d'essai et la tension de régime.

En Allemagne, on prescrit le coefficient 2 après fabrication et le coefficient 1,25 après pose.

En Italie, d'après les renseignements donnés par la Maison PIRELLI, le coefficient imposé varie au gré de l'acheteur, et cette même Maison indique comme suffisants les coefficients de 2 après fabrication et de 1,5 après pose.

En France et en Angleterre, les Associations prescrivent 3 après fabrication et 2 après pose.

C'est l'expérience industrielle qui a fait adopter ces derniers chiffres pour les câbles fonctionnant à 25.000 volts et au-dessous.

Il a été constaté que les câbles essayés au double après fabrication donnent des accidents en service, et que les câbles essayés au triple restent indemnes.

Pour les câbles à courant continu, on se contente en général de 1,5 après fabrication.

Si l'on veut appliquer la formule franco-anglaise à des câbles à 100.000 volts pour courant alternatif, on est conduit à les essayer sous 300.000 volts après fabrication et 200.000 volts après pose.

Ces essais sont d'une réalisation difficile, impossible dans bien des cas, et l'exécution du câble capable de les supporter reste encore problématique.

Mais l'opinion paraît prévaloir (et ici nous ferons appel à l'expérience personnelle des Membres du Congrès), que pour ces hautes tensions, un coefficient de sécurité aussi élevé n'est pas nécessaire.

Cette opinion a été soutenue notamment à la Société Internationale des Électriciens et au Congrès de Marseille de 1908 par MM. Brylinski et De Marchena; elle est confirmée par la Maison PIRELLI. Elle s'appuie sur des raisons sérieuses.

En effet, les surtensions consécutives à une fermeture d'interrupteur sur un câble à vide, seules proportionnelles à la tension de service, ne dépassent pas le double de cette tension.

Digitized by Google

Elles peuvent, il est vrai, en cas de fermeture au moment du maximum, atteindre deux fois la tension maxima instantanée, soit $2\sqrt{2}$ fois la tension efficace de régime.

Ce cas est extrêmement rare, si tant est qu'il se soit jamais produit, et des précautions faciles à prendre peuvent en éliminer les conséquences (Bobines de réactance ou résistances mortes insérées dans le circuit lors de la fermeture, etc.).

Les autres surtensions d'origine interne se produisent au moment de la rupture du courant de régime ou du courant de court-circuit; elles sont proportionnelles à la valeur de l'intensité au moment de la rupture.

L'intensité, pour une puissance donnée, étant inverse de la tension, les surtensions de coupure du courant du régime sont donc d'autant plus faibles que la tension de régime est plus haute.

Il paraît d'ailleurs résulter d'expériences directes que la coupure se fait, non pas au voisinage du maximum de l'intensité, mais, du moins avec les interrupteurs à huile, très près du passage par zéro.

Enfin, M. Boucherot a récemment montré que, dans le cas d'un court-circuit, l'énergie disponible dans le champ magnétique se disperse en partie dans l'alternateur par induction mutuelle.

Une troisième cause de surtensions réside dans les décharges atmosphériques; mais il y a lieu de remarquer que, d'après les derniers renseignements parvenus d'Amérique, on y supprime impunément toute protection pour les lignes aériennes fonctionnant à plus de 100.000 volts; si le fait se confirme, il en résulterait que les surtensions d'origine atmosphérique ne dépassent pas 100.000 volts.

En tenant compte de ces considérations, M. De Marchena a indiqué au Congrès de Marseille de 1908, la formule: Tension d'essai à l'Usine $= 10.000 + 2E$, E étant la tension de régime.

Cette formule paraît acceptable, d'après ce que nous venons de dire, pour les câbles de 25.000 volts à 50.000 volts en courant alternatif.

Au-delà, il paraît probable que l'on pourra réduire le coefficient de sécurité à 1,5 en négligeant même peut-être les 10.000 volts de constante.

En courant continu, le diélectrique fatigue beaucoup moins, car il n'y a pas d'hystérésis, et la tension efficace se confond avec la tension maxima.

Digitized by Google

Nous proposons donc que l'on se contente du coefficient 1,25 pour les câbles destinés à transmettre du courant continu.

Il faudrait, si l'on accepte ces coefficients, fabriquer des câbles tenant 180.000 volts aux essais à l'Usine pour pouvoir être reliés directement aux lignes aériennes à 120.000 volts alternatifs. C'est aux constructeurs qu'il appartient de répondre s'ils sont en mesure de le faire.

Remarquons d'ailleurs que les cables actuels ont, en dehors du coefficient de sécurité déterminé par la tension d'essai qu'ils supportent, un coefficient de sécurité réel double ou triple, déterminé par leur tension de claquage.

Il est probable que, le jour où les fabricants seront suffisamment maîtres de leur fabrication pour réduire sensiblement ce coefficient supplémentaire, on sera amené à augmenter le coefficient de sécurité d'essai.

Durée de l'essai à l'Usine. — Quant à la durée d'application de la tension, des expériences, récemment effectuées par M. Delon à Lyon et par M. Laporte du Laboratoire Central de Paris, ont paru montrer que, en courant alternatif, les tensions de claquage d'un câble diminuent régulièrement lorsque la durée d'application de la tension augmente, pour devenir asymptotes à la valeur réelle de claquage au bout de 15 minutes environ (1).

Ceci nous donne déjà une indication pour fixer à 15 minutes la durée de l'essai, si des expériences contraires ne sont pas signalées ici.

Essai de claquage. — A titre de renseignement, on pourra rechercher quel est le coefficient réel de sécurité en poussant jusqu'au claquage l'essai d'un bout sacrifié du câble.

Mais il ne faut pas oublier que, malgré les progrès récents réalisés dans la fabrication, il y a souvent des écarts supérieurs à 15 % dans les tensions de claquage des tronçons successifs d'une même longueur de fabrication.

Essai après pose. — L'essai après pose devient extrêmement onéreux si l'on veut le réaliser à pied-d'œuvre, en dehors de la Station Centrale, à l'aide d'un transformateur, car la puissance

(1) Heindrichs a trouvé que la même loi s'applique aux diélectriques compris entre électrodes planes. — *Proceedings A. I. E. E.*, Février 1911.

Digitized by Google

de l'appareil nécessaire croît très rapidement avec la tension d'essai et avec la longueur de la canalisation.

Mais il faut noter qu'il s'agit ici de vérifier simplement si le câble n'a pas souffert pendant le transport et si les raccords ont été assez bien faits pour supporter la tension de service.

Le diélectrique du câble ayant été essayé après fabrication pendant un quart d'heure dans des conditions très dures, n'a plus à être essayé de nouveau.

Il semble donc qu'on puisse, sans inconvénient, substituer à l'essai alternatif l'essai en courant continu obtenu par un redresseur ou une soupape électrolytique (Appareils SIEMENS, PICOU, DELON, etc.).

Les recherches expérimentales poursuivies par M. Delon pour trouver la valeur de la tension continue équivalente, comme effet disruptif à une tension alternative efficace donnée, lui ont montré que cette tension continue équivalait à 3,5 ou 4 fois la tension alternative efficace. Elles ont montré, en outre, que la valeur de la tension de claquage est indépendante de la durée de son application, ce qui prouve que le courant continu ne fatigue pas le diélectrique.

D'autre part, le coefficient d'équivalence est d'autant plus faible que le diélectrique est plus pâteux. On peut donc en conclure que l'essai en continu au coefficient 4 fera sûrement claquer les défauts provenant de rentrées d'eau.

Sur ce point, nous sollicitons encore l'avis du Congrès.

3. — Causes de danger spéciales aux câbles souterrains reliés aux lignes aériennes.

En dehors des surtensions internes que nous n'avons pas à étudier ici, les causes spéciales de danger sont:

A) Les décharges atmosphériques de fréquences plus ou moins élevées.

B) Le changement brusque d'impédance au point de jonction des parties aérienne et souterraine.

Les oscillations qui se propagent dans la ligne, forment, en

Digitized by Google

ce point, un ventre de potentiel, d'autant plus dangereux que l'accumulation des surfaces de fuite y affaiblit la défense contre la décharge.

4. — Précautions à prendre pour combattre ces deux causes de surtensions.

A) *Décharges atmosphériques.* — Nous avons vu que, d'après les Américains, la tension des décharges atmosphériques ne dépasse pas 100.000 volts. Donc, au-delà de 100.000 volts, il semble (et c'est encore un point à vérifier) qu'il n'y ait aucune précaution spéciale à prendre.

Jusqu'à 100.000 volts, il y a lieu de disposer les appareils de protection usuels, sur l'emploi desquels tout le monde est à peu près d'accord, comme il paraît résulter du tableau annexé.

Pour évacuer les décharges de tension anormale, on adopte, de préférence, un parafoudre à cornes monté directement sur le pylône.

Pour faire face aux décharges plus maniables, on utilise, soit un condensateur, qui a l'avantage de fonctionner d'autant mieux que la fréquence de l'oscillation est plus élevée, soit un déchargeur électrolytique, soit un déchargeur à courant d'eau.

Les déchargeurs à cylindres, dont le fonctionnement est délicat, semblent acceptables lorsque l'on dispose d'un poste fermé.

Pour les traversées très courtes, l'emploi de ces appareils de protection peut grever assez fortement les frais d'établissement et d'entretien. Peut-être y aurait-il avantage à toujours réaliser la traversée par un câble pouvant fonctionner à 100.000 volts, qui serait, d'après l'opinion rappelée plus haut, à l'abri des décharges atmosphériques. On pourrait alors supprimer toute autre protection.

Nous citerons, comme procédés spéciaux entrés plus ou moins nouvellement dans la pratique :

1. La cage de l'ingénieur SEMENZA, application de la cage de Faraday.

On relie chacun des fils de la ligne aérienne au plomb du câble correspondant par l'intermédiaire d'une bobine de self et d'un condensateur. Celui-ci offre aux oscillations un chemin d'autant plus facile que leur fréquence est plus haute, et il les écoule à la terre par le plomb du câble.

Digitized by Google

Renseignements sur les lignes à haute tension métalliquement reliées à des câbles souterrains.

Exploitants ayant fourni des renseignements	Longueur des câbles en Km.	Tension de Service en volts	Tension d'essai des câbles		Systèmes de protection adoptés au raccordement entre la ligne et le réseau
			à l'Usine	après pose	
Énergie électrique du Littoral Méditerranéen . . . . . (Var-Bouches-du-Rhône)		13.000	52.000	39.000	Spires de réactance — Parafoudres Wirt.
Société Romande d'Électricité à Territet		?	?	?	Parafoudres à cornes — Parafoudres à rouleaux — Résistances hydrauliques — Résistances liquides.
Grenobloise de Force et de Lumière	4,6	40.000	100.000	55.000	Parafoudres à cornes.
The Cleveland a. Durham County Electric Power Cy		20.000	?	?	Parafoudres à cornes avec résistances sur lignes importantes à très haute tension: électrolytiques sur feeders principaux: Système Merz Price.
Cie Edison - Milan					Cage de Semenza.
Transport Moutiers-Lyon		50.000 (en continu)	75.000		Parafoudres à cornes.

Digitized by Google

Constructeurs ayant fourni des renseignements					
Brown et Boveri					Parafoudres placés en postes clos (contrôle et nettoyage périodique) — sensibilité faible — cornes avec self et résistance ; grande sensibilité — rouleaux courant d'eau
British Insulated and Helsby Cables L^td	48	20.000	150.000		Parafoudres à cornes — Quelques électrolytiques — Quelques Moscicki.
National Conduit Cabley C^y - New York	16	33.000		70.000	Parafoudres sur la ligne aérienne.
Pirelli - S.^ta Alta Italia - Torino	traversées de voies	25.000	variable suivant les clients; la Maison Pirelli conseille 2 E	variable suivant les clients; la Maison Pirelli conseille 1,5 E	La Maison considère que les surtensions ne sont pas à craindre si l'on adopte les coefficients ci-contre et le sont d'autant moins que E (tension de régime) est plus élevée.
„ - S.^ta Lombarda - Milano		25.000			
„ - S.^ta Idroelettrica Ligure - Spezia		30.000			
„ - Acquedotto Ferrari-Galliera - Gênes		25.000			

Digitized by Google

Comme le tableau l'indique, ce procédé est utilisé par la Compagnie EDISON de Milan.

2. Le système du disjoncteur automatique MERZ PRICE, employé en Angleterre et notamment à la Cleveland and Durham Cy.

Il a pour but d'éliminer une portion de feeder où un défaut se produit. Deux transformateurs sont placés en série aux deux extrémités du câble à protéger et sont parcourus par le courant de ligne. Lorsqu'un défaut se produit dans le câble, le déséquilibre qui en résulte entre les deux transformateurs fait jouer un relai qui déclanche un disjoncteur.

B) *Ventres de potentiel au point de jonction.* — Puisque c'est en ce point que se produisent, lors des oscillations, les ventres de potentiel, il est nécessaire et il suffira d'y renforcer les isolants tout en augmentant les distances entre les conducteurs.

Pour les canalisations de 25.000 à 40.000 volts, on coiffe les câbles souterrains de boîtes d'extrémités soigneusement remplies de matière isolante, et de forme extérieure triangulaire.

Les câbles souples de jonction sortent en éventail par des tubulures en porcelaine, et se trouvent ainsi portés, sur une courte distance, à un écartement suffisant.

Au delà de 40.000 volts, cette disposition ne suffit plus. On cherche à séparer et à prolonger, le plus possible, les isolateurs en porcelaine.

P. ex., la Maison GEOFFROY & DELORE a proposé de faire aboutir le câble souterrain dans une jonction ordinaire d'où sortent, du côté opposé à l'entrée, les conducteurs simples isolés et armés, grimpant le long du pylône, au sommet duquel ils s'écartent pour s'arrêter chacun dans un isolateur distinct.

La Société Française des Câbles BERTHOUD-BOREL emploie un dispositif basé sur le même principe.

Nous ne doutons pas qu'il soit apporté devant le Congrès d'autres solutions au problème.

Il y a grand intérêt à trouver un dispositif satisfaisant, car c'est là, certainement, le point le plus délicat dans les installations mixtes.

Nous adressons nos vifs remerciements aux Compagnies et aux Industriels qui ont bien voulu nous fournir des renseignements, et nous serons heureux de pouvoir les compléter par les indications nouvelles qui nous seraient données.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. E. JONA (Milan). *J'ai entendu avec beaucoup de plaisir la lecture du rapport de M. Grosselin, dans lequel il a su condenser en peu de pages plusieures questions intéressantes.*

J'ai regretté seulement de n'avoir eu connaissance de ce rapport qu'au dernier moment, de sorte que je n'ai pas pu me préparer à cette discussion. Je n'ai pas d'ailleurs le plaisir de voir dans la salle quelques-uns des ingénieurs qui s'occupent spécialement de la fabrication des câbles, et qui auraient pu prendre la parole, avec une grande compétence, dans cette discussion: mais du moment que la discussion est ouverte, je me permettrais de vous dire quelques mots sur ce sujet.

M. Grosselin s'occupe beaucoup plus des câbles en général que de la question spéciale qui forme le titre de son rapport: et je ferai de même dans ma discussion.

A pag. 2 il est dit que les constructeurs seraient prêts à livrer des câbles fonctionnant à 50.000 volts en courant alternatif et à 100.000 volts en courant continu. On fixe ici un rapport 1 à 2 pour la tension de régime du même câble en courant continu. Il me semble que cela soit un peu prématuré. En vérité nous ne savons pas encore exactement comment se comporteront les câbles en courant continu. Nous n'avons pas encore assez d'expérience en la matière. On a posé un câble pour 50.000 volts de courant continu dans l'installation Moutier-Lyon il y a trois ou quatre ans. On assure qu'il fonctionne très régulièrement: mais c'est le seul exemple que nous connaissions. Je crois que ce câble a été dimensionné à peu près comme s'il s'agissait de 50.000 volts alternatifs, de sorte que le diélectrique de ce câble y est bien peu fatigué. Si nous acceptons ce rapport 1:2, ce câble devrait avoir, au contraire, des dimensions semblables à celles d'un câble pour 25.000 volts alternatifs, de sorte que le diélectrique serait soumis à une tension spécifique bien plus élevée.

Or il est bien possible que le diélectrique d'un câble soumis très longuement à une tension spécifique très élevée, en courant continu, se polarise, en quelque sorte, pour m'exprimer ainsi, et que ses qualités diélectriques changent. Nous savons que l'on peut faire de l'électrolyse aussi avec le courant alternatif: mais il faut se mettre dans des conditions spéciales que l'on ne rencontre pas dans les câbles. Il est vrai qu'une tension continue de 1000 volts fatigue le diélectrique proportion-

Digitized by Google

nellement à 1000 volts: tandis qu'une tension alternative efficace de 1000 volts le fatigue, à un certain moment de la période, proportionnellement à 1400 volts: il est vrai aussi, ou du moins on l'admet en général, que le courant alternatif a des qualités disruptives particulières que le courant continu n'a pas: mais je crois que le moment n'est pas encore venu de fixer ce rapport 1:2. On n'a pas encore fait de véritables expériences à très hautes tensions avec de véritables machines à courant continu; on a étudié des redresseurs qui travaillent tout autrement. Du reste, comme je l'ai dit, la question des phénomènes que présentent les diélectriques soumis à une très haute tension continue pourra bien être prise en considération.

Quant au coefficient de sécurité, je crains que la définition de M. Grosselin ne soit imparfaite. Le coefficient est le rapport entre la tension de disruption du câble et la tension normale de régime et non celui entre la tension d'essai et celle de régime. Le constructeur est forcé d'accepter pour un même câble et pour une même tension de régime une tension d'essai différente au gré du client: mais évidemment le coefficient de sécurité ne varie pas.

Quant à la tension d'essai en elle-même, je trouve qu'en général on l'exagère dans les essais. Nous avons un peu l'habitude de l'extrapolation: et comme on essayait autre fois les câbles à une tension double ou même triple de la tension de régime, on voudrait faire de même aujourd'hui, pour toute sorte de câble à toute tension. Mais, si pour les petites tensions de 4000-5000 volts on peut parfaitement exiger des essais à 8000-10.000 volts, cela ne peut plus se faire pour des tensions très élevées. Dans la fabrication pratique des câbles il n'a rien été fait de bien nouveau, quant au principe, dans ces dernières dix ou quinze années. La construction c'est améliorée peu à peu, sur une foule de détails: ce qui fait qu'un câble actuel est bien meilleur qu'un câble des mêmes dimensions et type d'il y a quinze ans. Mais il faut bien avouer que, si l'on peut monter très haut dans les tensions, c'est un peu aux frais du coefficient de sécurité: on pourra obtenir un surcroît de surveillance et de soins dans la fabrication, mais c'est tout: car d'un côté on ne peut pas pratiquement augmenter suffisamment l'épaisseur de l'isolant de manière à réaliser la même tension spécifique sur le diélectrique que celle qu'on aurait sur un câble de tension modérée: et, d'autre part, on emploie les mêmes matériaux isolants (papier, huiles, résines: le caoutchouc coût trop cher, et on ne pourrait l'employer pour un réseau tout entier) pour un câble à 5000 volts que pour un câble à 50.000 volts, de sorte que le coefficient de sécurité d'un câble à très haute tension est nécessairement plus faible que celui d'un câble à tension plus modérée. Dans

Digitized by Google

le but de pouvoir augmenter les épaisseurs d'isolant sans arriver à des dimensions et à des poids excessifs dans le câble on a préconisé l'emploi de câbles simples, au lieu de câbles à 3 conducteurs pour les réseaux triphasés: ce sera là peut-être encore un petit pas que nous pourrons faire dans l'usage des câbles pour des réseaux à très haute tension.

Je me range parfaitement à l'opinion citée par M. Grosselin, que pour des tensions très élevées il n'est pas nécessaire d'avoir un coefficient de sécurité très élevé: car les surtensions d'origine intérieure augmentent bien moins que la tension de régime. J'ajouterais seulement que nous sommes heureux qu'il en soit ainsi, car il serait impossible de monter proportionnellement le coefficient de sécurité.

Quant aux surtensions d'origine atmosphérique, je lis dans le rapport de M. Grosselin que, d'après des renseignements venus d'Amérique, il paraîtrait que les surtensions d'origine atmosphérique ne dépasseraient pas 100.000 volts. Je ne m'arrêterai pas sur ce point: je vois ici M. Torchio qui est très au courant des installations américaines; il voudra bien, je l'espère, nous renseigner là-dessus. Je ne crois pas cependant que nos amis américains soient arrivés à mesurer la tension de la foudre...

M. P. TORCHIO (New York). *Pas encore.*

M. E. JONA (Milan). *Mais je pense que 100.000 volts c'est bien peu: la nature a des moyens bien plus puissants à sa disposition.*

Tout en restant dans les tensions de la pratique actuelle, je crois que la formule de M. de Marchena

$$\text{Tension d'essai} = 2\,\mathrm{E} + 10.000 \text{ volts}$$

où E *est la tension de régime, donne encore des tensions d'essai trop élevées. Je ne vois pas avant tout pourquoi nous voulons nous astreindre à une équation linéaire si simple, et non à un tableau ou une courbe ou une formule plus complexe. Un câble à 10.000 volts de régime, tension très commune aujourd'hui, devrait être essayé à 30.000 volts. Je pense que c'est trop: le diélectrique se fatigue inutilement dans un essai semblable. Un câble pour 10.000 volts de régime ne devrait pas être essayé à plus de 20.000 volts: mais on peut bien exiger un essai à 50.000 volts sur une courte pièce de câble qu'on laisserait de côté après l'essai. Il faut encore remarquer que l'on prétend en général faire ces essais à la même tension entre les conducteurs et entre les conducteurs et le plomb; cela revient encore à un surcroît du coefficient de sécurité entre les conducteurs et le plomb, où la tension entière du système n'existe que par exception, pour peu de temps, si l'une des phases se trouve mise à la terre.*

Digitized by Google

Je ne veux pas proposer ici une formule en substitution à celle de M. de Marchena; je n'y suis pas préparé. Mais je crois que, pour un câble à 50.000 volts de régime, il serait suffisant de considérer un essai à 75.000 volts sur toute la longueur du câble, et un essai à 150.000 volts sur une petite pièce de quelques mètres de long. Il faut aussi remarquer que le constructeur tient à avoir pour lui-même un coefficient de sécurité: s'il accepte un essai à 150.000 volts, il doit être sûr que son câble ne claquera qu'à une tension encore plus élevée.

J'ajouterai encore une comparaison. On essayait les chaudières, il y à quelques quinze ou vingt ans, à des pressions très élevées: disons, le double de la pression de régime. On a reconnu ensuite que cet essai fatiguait trop la chaudière, qui en restait détériorée, quoique la détérioration ne fût pas très apparente, et l'on a réduit la pression d'essai. Je pense que le diélectrique d'un câble se fatigue aussi et se détériore, quoique pas d'une façon immédiatement visible, en le soumettant à des tensions d'essai trop fortes. Je sais bien que quelques ingénieurs ne sont pas de cet avis: mais j'ai eu bien des fois occasion de constater une telle détérioration, bien avant la tension de rupture du câble.

M. Omer de Bast (Liège), *Président, demande à M. Jona son opinion sur la durée des essais.*

M. E. Jona (Milan). *Quant à la durée de l'essai je vous dirais qu'en Italie il est normal d'essayer tous les câbles pour une heure ou deux, après 24-48 heures d'immersion dans l'eau. On met les bobines dans l'eau, dès qu'elles sont sorties de la presse à plomb, avant de les armer. J'ai vu dans une grande Usine Américaine que l'on essayait les câbles durant un quart d'heure, presque à peine sortis de la presse à plomb, sans les mettre dans l'eau. J'adopterais bien volontiers cette dernière pratique, qui évite d'emmagasiner dans l'usine un trop grand nombre de bobines et de ralentir la fabrication. La température encore élevée du câble ne permettrait pas de déterminer exactement la résistance d'isolement en mégohms; mais on est aujourd'hui bien d'accord pour ne donner à cela qu'une importance bien médiocre, ou tout à fait nulle. L'essai de tension au contraire peut très bien se faire: car la température a très peu d'influence sur la rigidité diélectrique du câble. Quant à l'habitude de mettre les bobines dans l'eau avant l'essai, il est vrai qu'elle nous permet quelques fois de découvrir s'il y a un défaut dans le plomb. Mais les défauts sérieux seraient tout de même décelés par une inspection minutieuse et soignée du câble; tandis que s'il y a dans le plomb une toute petite impureté, un petit grain qui donne à l'eau un accès difficile, il arrive aussi quelque fois qu'une petite goutte d'eau pénètre sous le plomb, et n'a pas le temps d'abîmer le câble dans le peu*

Digitized by Google

de jours qu'il reste encore soumis aux essais. Cela donnera lieu à un défaut qui se manifestera bien plus tard, après des semaines peut-être. Tandis que si l'on n'avait pas mis les bobines dans l'eau, les couches successives de papier imprégné et de matières huileuses et résineuses auraient bouché la petite cavité et aucun défaut ne se serait manifesté.

Je suis favorable à un essai à une tension plus modérée, comme je l'ai déjà dit, mais prolongé durant une heure et demie ou deux heures: cela me paraît préférable à un essai à très haute tension durant un quart d'heure, ou 5 minutes, comme il est demandé par quelques ingénieurs.

Le Rapport de M. Grosselin fait aussi mention des recherches de M. Delon sur l'utilisation d'un redresseur synchrone, pour essayer les câbles à une haute tension continue. Je pense qu'un appareil de ce genre peut effectivement rendre de très bons services aux constructeurs: mais je ne saurais pas accepter sans caution le coefficient de 3-4 indiqué dans le rapport de M. Grosselin. M. Delon, puisqu'il a préparé une communication à ce sujet, voudra bien, je l'espère, nous dire quelque chose là-dessus.

M. G. L'HOEST (Bruxelles). *Ainsi qu'on l'a fait justement remarquer, il existe une certaine analogie entre l'épreuve des câbles électriques et celle des générateurs à vapeur. Pour ces derniers il y a tendance à réduire les pressions d'épreuve, afin de ne pas outrer la fatigue des chaudières: il semble rationnel d'agir de même à l'égard des câbles.*

Mais il est à remarquer que les appareils à vapeur sont garantis par l'essai à la rupture de leurs tôles, et que cette épreuve n'a pas de correspondante dans les essais de câbles. Peut-être y aurait-il lieu d'essayer des bouts de câble jusqu'à perforation afin de juger de la fabrication, et de déterminer le véritable coefficient de sécurité.

M. E. JONA (Milan). *Ce que nous faisons habituellement en Italie correspond précisément aux essais des chaudières. Dans ces essais on soumet la chaudière à une pression un peu supérieure à celle du régime, et, séparément, on essaye le métal jusqu'à rupture. De même nous essayons tous les câbles à une tension supérieure à celle de régime, et, séparément, nous essayons une petite pièce du câble jusqu'à perforation. Malheureusement il y a aussi en Italie des ingénieurs qui prétendent essayer tout le câble à une tension très élevée; nous ne pouvons pas nous y soustraire, car, arrivant alors à marchander le prix vis-à-vis des prix de la concurrence, on finit par marchander les tensions d'essai.*

M. L. LICHTENSTEIN (Berlin) *est d'avis que la tension de service de 40.000 à 45.000 volts doit être considérée comme une limite supérieure pour des câbles à trois conducteurs. Au delà de cette tension il serait plus sûr d'employer des systèmes de câbles simples.*

Digitized by Google

Des câbles de cette sorte ont été posés par la maison Siemens-Schuckert il y a six mois; ils travaillent sous une tension de service de 60.000 volts, sans qu'aucun incident se soit produit.

Les câbles mentionnés servent pour l'alimentation du chemin de fer Bitterfeld Dessau. Ces câbles ont été essayés après la pose sous une tension de 50.000 volts à courant alternatif, entre les conducteurs et la terre. La formule communiquée par M. Grosselin pour déterminer la tension d'essai à l'usine, soit 2 E + 10.000 volts, paraît tout à fait acceptable à l'orateur.

M. P. Torchio (New York). *En répondant à M. Jona, qui a demandé à connaître les tensions des décharges atmosphériques, je crois que M. Grosselin a basé ses affirmations sur les résultats donnés par la transmission de Michigan à 110.000 volts, qui a été installée sans déchargeurs ni paratonnerres. L'installation a été en service durant une bonne année, sans avoir donné lieu à aucun inconvénient du fait de décharge atmosphérique.*

On en a déduit que cela dépendait de la tension relativement basse des décharges, mais la plupart des électriciens sont d'accord pour attribuer ce résultat à " l'effet de couronne ou de dispersion „, sous l'influence duquel l'énergie relativement petite des décharges atmosphériques peut se dissiper d'elle-même.

Si l'on accepte cette explication, la " couronne „ constituerait une protection automatique des installations à très haute tension. Évidemment ces résultats ne peuvent pas être étendus au cas des câbles souterrains. D'un autre côté, cette théorie doit être accueillie avec beaucoup de réserves, et c'est justement pour cela que je n'en ai pas parlé dans mon Rapport. Il faut aussi ajouter que l'ingénieur chef du service au Michigan est en train d'installer des déchargeurs dans une autre installation en cours de construction.

M. E. Jona (Milan). *M. Torchio nous a dit que dans l'installation de Michigan à 110.000 volts, on n'avait pas mis de dispositifs de protection contre les décharges atmosphériques: et que d'après quelques ingénieurs américains la* Corona, *ou l'effluve qui se produit sur les fils à des tensions très élevées, fonctionnerait comme un déchargeur et empêcherait la formation de surtensions très grandes.*

Ce serait un point très intéressant à étudier. Il peut paraître de prime abord un peu étrange que les effluves puissent suffire à ce but: je n'en sais rien, je me permets de rappeler à votre attention le beau travail de l'ingénieur italien M. Campos. Il a trouvé qu'il suffirait de nickeler la ligne aérienne sur une longueur de quelques centaines de mètres en amont du câble (ou en général des appareils que l'on veut

Digitized by Google

protéger) pour absorber et détruire toute surtension à haute fréquence. On voit par là que l'on peut obtenir quelques fois de grands effets avec de petits moyens.

M. J. DELON (Lyon). *Ayant préparé une Communication sur le redresseur d'essai, je renvoie à l'occasion de la lecture de cette Communication toute discussion sur ce sujet. De la discussion précédente il résulte que les tensions d'essais généralement admises en France sont beaucoup plus élevées que celles qui sont proposées par les Membres du Congrès. Par exemple, on admet que tous les câbles doivent être essayés au triple de leur tension normale de fonctionnement, mais il n'est pas rare de voir essayer des câbles à 10.000 volts à 4 fois leur tension de service.*

Lorsqu'il s'est agi de fabriquer des câbles à 25.000 volts, on les a aussi essayés à 4 fois la tension de service.

J'ai eu occasion aussi de fabriquer dans les ateliers de la Société Française des câbles électriques (système Berthoud Borel) à Lyon, des câbles triphasés à 40.000 volts. Ils ont été essayés à 120.000 volts.

Enfin, ce coefficient de sécurité n'a été réduit que lorsqu'il s'est agi tout récemment de fabriquer des câbles triphasés à 65.000 volts. Ils ont été essayés à 130.000 volts.

Il paraît résulter de l'expérience acquise, que ce dernier coefficient de sécurité est suffisant pour les câbles qui doivent fonctionner à aussi haut voltage.

M. E. SOLERI (Turin) *est d'avis qu'à l'égard des appareils de protection pour les câbles souterrains reliés à des lignes aériennes, il convient d'analyser de très près les phénomènes relatifs aux surtensions, et de distinguer ceux qui proviennent de causes internes de ceux qui ont une origine atmosphérique. Il est impossible de soutenir que tous les types de déchargeurs conviennent également bien pour protéger des câbles reliés à des lignes aériennes.*

Il est certain, par exemple, que les dispositifs à brusque rupture de l'arc, tels que les déchargeurs à cornes ou autres appareils similaires, sont à écarter, car la théorie et l'expérience démontrent que la rupture brusque d'un arc suffit à elle seule à causer des surtensions nuisibles aux câbles. Il conseillerait plutôt les appareils à décharge fractionnée ou à dispersion, tels que les cylindres de Wurts, les déchargeurs à circulation d'eau ou les déchargeurs électrolytiques à éléments d'aluminium.

Il faut avouer qu'on ne possède pas encore assez de résultats d'expérience pour se croire autorisé à préférer l'un ou l'autre de ces derniers types d'appareils: il conviendra sans doute de les employer parfois tous ensemble, afin de parer aux causes diverses de fulmination.

En ce qui concerne le coefficient de sécurité à imposer aux construc-

Digitized by Google

teurs de câbles, et à insérer dans les contrats, l'ing. Soleri rappelle que dans la récente et importante commande que les Chemins de Fer du Gouvernement Italien ont fait à la Société Anonyme V. Tedeschi & C. pour la traction électrique dans le tunnel du Mont Cenis, les câbles qui serviront à alimenter la ligne, et qui fonctionneront à 8000 volts, devront résister, sous l'eau, pendant une demie heure, à la tension de 20.000 volts en courant alternatif, et à une tension de perforation supérieure à 50.000 volts correspondant à un coefficient de sécurité qui s'approche de 8. Ces câbles, en effet, ont résisté jusqu'à 135.000 volts à la perforation.

M. E. GEVAERT (Bruxelles). *A la suite de l'observation de M. Delon, au sujet de l'exagération des tensions d'essai, réclamées par les clients, et qui représentent 3 ou 4 fois la tension de service, fait remarquer qu'il n'est pas rationnel d'adopter une règle uniforme en matière de tensions d'essai.*

Ces essais ont pour but de mettre les câbles en situation de résister aux surtensions d'ordre intérieur, qui ne sont pas un multiple constant de la tension de service. Cependant, tout en ne prétendant nullement que l'on puisse régler les tensions d'essai par une formule, qui donne satisfaction dans tous les cas, en les faisant dépendre de la tension de service, il pense, qu'à la règle de la proportionnalité absolue il serait bon de substituer celle déduite de la relation 10.000 volts + 2 E.

M. H. DUBS (Rome). *Ce que nous désirons, en somme, pour nos exploitations, ce sont des câbles offrant une marge de sécurité convenable.*

Ne pourrions-nous pas fixer, comme nous le faisons pour les constructions métalliques par exemple, un coefficient de sécurité, en tenant compte dans chaque cas, bien entendu, des conditions d'installation et de fonctionnement du câble considéré? En d'autres termes, ne devrions-nous pas fixer un coefficient de sécurité, de 5 par exemple, en adoptant comme tension d'épreuve celle qui, tenant compte de la rélation entre la résistance à la rupture du diélectrique et la tension normale de régime, soumettrait le diélectrique à une charge 5 fois plus grande que celle correspondant à la tension de service?

Nous arriverions sans doute ainsi, d'une manière générale et tout en disposant d'une marge de sécurité pratiquement suffisante, à des tensions d'épreuve sensiblement inférieures à celles qui résultent des formules arbitraires actuellement appliquées, et qui fatiguent évidemment nos câbles.

M. E. SOLERI (Turin). *Les tensions d'essais des câbles ne peuvent pas être déterminées par une loi de proportionnalité aux tensions de service: elles doivent, au contraire, dépendre des surtensions à prévoir dans les*

Digitized by Google

câbles, soit par suite de causes internes soit comme résultat de décharges extérieures.

Or, les surtensions d'origine interne, dans la plupart des cas dépendent de l'intensité du courant qui traverse les câbles bien plus que de la tension de service, tandis que les fulgurations d'origine extérieure sont tout à fait indépendantes de la tension de service.

La tension d'essai doit principalement se fixer d'après la surtension que, dans chaque câble de grande longueur, on peut prévoir à l'extrémité la plus éloignée par rapport à la tension au point d'alimentation. Cette surtension arrive, au plus, à une fois et demie la tension initiale.

Enfin l'orateur se déclare contraire aux essais de tension exécutés au moyen de courant redressé: il estime que ce système ne tient pas compte de la manière dont le diélectrique se comporte, sous l'action de la tension alternative, en s'échauffant, ce qui altère ses propriétés de rigidité diélectrique.

Il doute fort que la clientèle se plie à un tel système d'essais, qui ne réalise pas les conditions pratiques de fonctionnement des câbles.

Personne ne demandant plus la parole, le Président clôt la discussion.

Digitized by Google

Digitized by Google

Sur un procédé et appareil permettant de substituer le courant continu au courant alternatif pour les essais des canalisations électriques avant leur mise en exploitation.

J. Delon (Lyon)

La réception d'une canalisation électrique, avant sa mise en service, comporte généralement deux essais:

1) L'essai d'isolement.

2) L'essai de rupture du diélectrique.

Le premier n'offre aucune difficulté, et suffit à renseigner sur l'état de la canalisation lorsqu'il ne s'agit que d'une distribution à basse tension.

Il n'en est pas de même du deuxième qui devient très difficile à réaliser sur les câbles haute tension, parce que la puissance apparente, et, par suite, la dimension du transformateur nécessaire, augmente comme le carré de la tension d'essai et comme la capacité du câble à vérifier.

En réalité, cette difficulté fait que dans la plupart des cas l'essai après pose n'est pas fait, et qu'on se contente d'une mesure d'isolement qui peut donner une indication de certains défauts, mais ne renseigne en rien sur les fissures ou d'autres défauts qui se sont produits pendant la pose.

Cette absence de vérification cause une véritable gêne, et a déjà provoqué bien des discussions.

Pour remédier à cette situation, on a proposé depuis quelque temps de faire l'essai en courant continu, et divers appareils ont été proposés dans ce but.

Digitized by Google

Je vais décrire celui que j'ai mis au point dans le Laboratoire de la " Société Française des Câbles Électriques à Lyon „, et qui est déjà adopté sur un grand nombre de réseaux importants.

Considérons (figure 1) une tige conductrice t isolée dans un disque d'ébonite qui tourne autour d'un arbre perpendiculaire à son plan.

Quatre balais fixes b_1 b_2 b_3 b_4 sont calés à 90° l'un de l'autre à très petite distance du disque, de façon à se trouver presque au contact de la tige quand celle-ci passe devant eux. Les balais fixes occupent les extrémités des deux diamètres perpendiculaires à l'axe du disque.

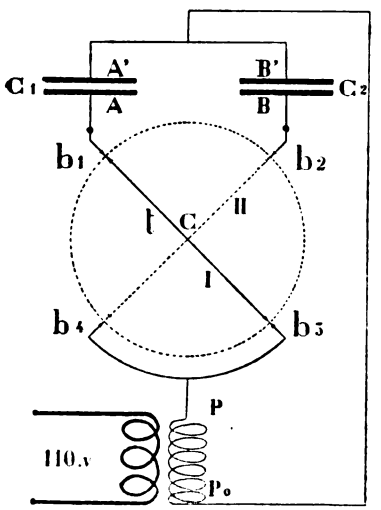


Fig. 1.

Deux des balais contigus sont reliés électriquement et connectés à l'une des bornes secondaires d'un transformateur, les deux autres sont reliés chacun à l'une des armatures extrêmes des deux condensateurs C_1 et C_2 montés en série. L'armature commune est reliée à la seconde borne du transformateur.

Le disque est entraîné par un moteur synchrone à 4 pôles, alimenté par le courant qui fournit la haute tension par l'intermédiaire du transformateur. Il fait donc $^1/_2$ tour pendant chaque période.

Supposons donc que les balais soient calés de telle façon, que la tige occupe la position b_1 b_3 au moment d'un maximum de

Digitized by Google

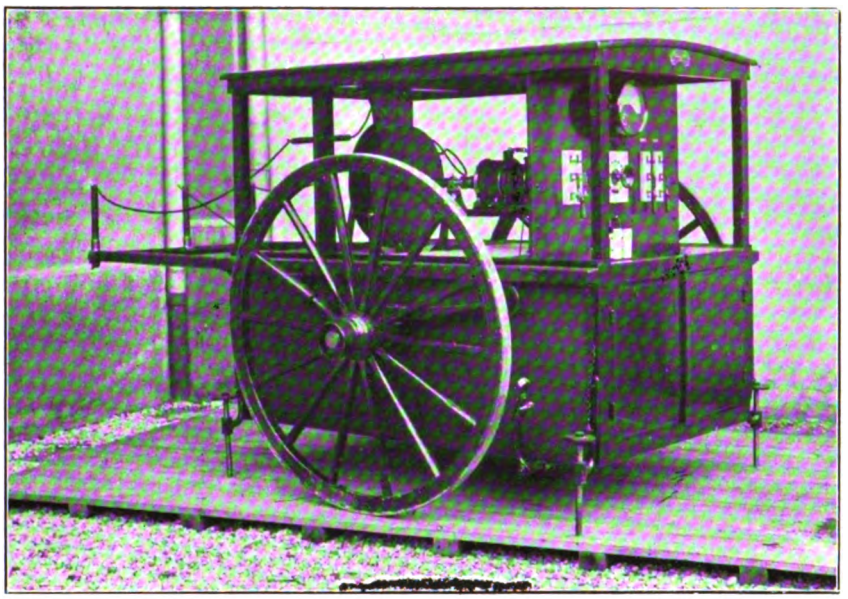


Fig. 2.

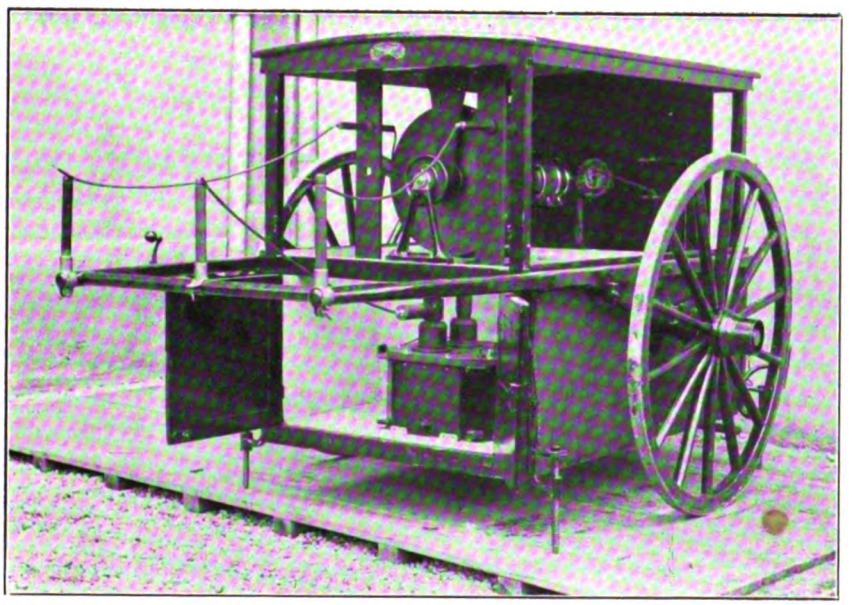


Fig. 3.

Digitized by Google

Digitized by Google

la courbe de la différence de potentiel. Le condensateur C_1 prend une charge qui dépend de la valeur de la self-induction et de la capacité du transformateur, et de la tension maximum du courant secondaire. Cette charge subsiste, puisque le contact est immédiatement rompu.

Au bout d'une demi-période, la tige se trouve dans la position b_2 b_4 et le condensateur C_2 se charge à son tour sous une différence de potentiel égale et de signe contraire à celle qu'a pris le condensateur C_1 puisque le courant s'est inversé.

Les phénomènes se reproduisent à chaque période en sorte qu'on arrive rapidement à obtenir entre les bornes extrêmes des deux condensateurs une différence de potentiel double du maximum de la tension alternative employée, soit 2,8 fois la tension efficace.

Si l'on a branché entre les points A et B le câble que l'on veut essayer, il se trouve soumis à la tension totale. Il faut cependant tenir compte dans ce cas que la capacité propre du câble prolonge la durée de la mise en charge. Pratiquement, celle-ci est obtenue en moins d'une minute sur du courant à fréquence 50, soit en moins de 6000 contacts. On conçoit facilement qu'avec ce système on puisse atteindre des charges continues très élevées en faisant usage de transformateurs de puissance faible. La seule difficulté résidait dans la réalisation pratique de l'appareil.

Celui qui a été construit par la S^{té} Française des Câbles Électriques et qui est représenté sur les figures 2 et 3, est renfermé dans une voiture à bras dont le poids total atteint environ 600 kilos, ce qui en rend le déplacement très facile avec deux hommes.

Comme on le voit sur les figures, la voiture renferme à la partie arrière un petit tableau de manœuvre muni des interrupteurs et commutateurs pour le démarrage du moteur synchrone, son accrochage, la fermeture et le réglage du courant primaire du transformateur.

Le moteur synchrone est monté directement sur l'arbre du contact tournant; il est muni, également sur le même arbre, d'un moteur asynchrone qui assure le démarrage.

La tige qui établit les contacts est parfaitement isolée dans un disque d'ébonite, d'où ses extrémités sortent seules. Les quatre balais fixes sont portés par une monture en ébonite, qui peut tourner autour de l'axe de rotation du disque pour donner aux

Digitized by Google

balais le calage le plus favorable. Tous ces organes, qui forment la partie essentielle du dispositif, sont placés dans la partie supérieure en avant de la voiture et sont parfaitement accessibles quand on a enlevé les panneaux latéraux et antérieurs.

Le transformateur est logé dans la partie inférieure, au-dessous du contact tournant, et parfaitement dégagé pour éviter que des étincelles éclatent entre ses bornes et les parois de la voiture. Ce transformateur est muni de deux enroulements primaires qui, mis en parallèle ou en tension, permettent d'obtenir au secondaire 15.000 ou 30.000 volts efficaces avec 110 volts au primaire. L'appareil, tel qu'il est, permet donc de charger un câble jusqu'à environ $2 \times 30.000 \times 1,4$ soit 84.000 volts. Avec un peu de surcharge on peut dépasser 100.000 volts.

Il est d'ailleurs facile de réaliser un appareil pouvant monter jusqu'à 150.000 volts et de le loger dans une voiture analogue.

Pour atteindre des voltages plus élevés, il faut avoir recours à des installations fixes, car les distances explosives que l'on est obligé d'observer conduiraient à donner à la voiture des dimensions exagérées.

Avec un appareil fixe, construit sur le même principe, et qui est installé dans le Laboratoire de la S^{té} Française des Câbles Électriques, il est possible d'atteindre le voltage de 350.000 volts.

Ainsi qu'il est dit plus haut, l'appareil transportable est déjà employé depuis quelque temps, et a permis de réaliser un certain nombre d'essais qu'il eût été à peu près impossible de faire en courant alternatif.

Dans l'un de ces essais, il s'agissait de verifier un câble à 3 conducteurs, de 25 mmq. de section chacun, tension efficace normale 10.000 volts. Ce câble devait être essayé à 30.000 volts. La longueur de la canalisation était d'environ 12 kilomètres.

Il aurait fallu, pour faire l'essai en alternatif, un transformateur d'une puissance de 300 KVA, tandis que la consommation de l'appareil n'a jamais dépassé 3 Ampères sous 110 volts, soit 330 Voltampères.

Au cours de divers autres essais exécutés avec le même appareil, quelques défauts qui s'étaient produits pendant la pose ont été révélés par l'essai en courant continu; les uns provenaient de coups de pioche donnés par les terrassiers, d'autres étaient des défauts de montage. L'appareil, malgré sa très faible puissance, a permis de les déceler complètement, car l'isolant

Digitized by Google

était entièrement carbonisé par l'étincelle disruptive au bout de quelques minutes d'application de la tension.

Cet appareil permet donc de faire facilement, à tension constante, l'essai après pose des câbles à haute tension, pour lesquels on se contente généralement d'une mesure d'isolement qui ne fournit que des indications tout à fait insuffisantes.

Des objections se sont déjà élevées contre la méthode.

Quelques personnes estiment que les causes de perforation des câbles sont tout autres en alternatif qu'en continu.

Il paraît cependant bien facile d'établir le rapport qui existe entre une tension alternative et une tension continue capables de produire, toutes deux, les mêmes effets disruptifs. Cette étude a déjà été entreprise, et a montré que ce rapport varie avec la nature de l'isolant que l'on étudie.

Il suffit donc que les Constructeurs et les Exploitants se mettent d'accord sur la valeur de la tension d'essai que l'on adoptera pour un isolant déterminé, et toutes objections ne tarderont pas à disparaître.

Si l'on se rappelle que l'essai prévu n'a pour but que de constater les défauts qui ont pu se produire en cours de pose, on conviendra que la méthode, si elle n'apporte pas une sécurité absolue quant à la marche en régime, donne beaucoup plus d'indications que l'absence totale de vérification qui est la règle actuelle.

DISCUSSION

M. E. JONA (Milan). *Il n'est pas douteux que le redresseur tournant synchrone peut être très avantageux dans les essais des câbles à haute tension, spécialement pour les essais d'un réseau assez grand dans lequel le courant de charge nécessiterait l'emploi d'un transformateur de grande puissance qu'on ne peut pas se procurer facilement sur place. Mais il*

Digitized by Google

me semble qu'il soit difficile de prévoir le rapport entre la tension du courant alternatif et celle du courant redressé donnant le même effet sur le câble.

Ce redresseur travaille seulement sur une très petite partie de la courbe du courant: si l'on voulait en utiliser une grande partie il y aurait des étincelles troublantes aux contacts. Par suite le câble reste relié à la source d'énergie durant seulement une très petite fraction de la période. M. Delon nous a dit que les essais faits à l'oscillographe démontrent que le potentiel du câble ne varie pas plus de 2 % entre deux contacts successifs. Cela est parfaitement possible tant que le câble résiste parfaitement aux essais: il n'y a presque pas de pertes dans le câble, sauf les pertes à la surface des deux bouts. Mais si le diélectrique ne résiste pas parfaitement, la chose est bien différente. Je ferai encore ici une comparaison avec une chaudière.

Supposons que l'on essaye une chaudière à la pression hydraulique: et que dans la chaudière, pleine d'eau, la pression soit donnée, non par une pompe de dimensions convenables, mais par un long tuyau vertical de petit diamètre, plein d'eau.

S'il n'y a pas de déformations, le tuyau reste plein d'eau, et la chaudière reste sous pression: mais s'il y a un commencement de déformation le tuyau est rapidement vidé et il n'y a plus de pression. La chaudière n'éclaterait pas sous un essai de ce genre. Mutatis mutandis, *il en serait de même pour le câble, il ne sera effectivement soumis à une tension dangereuse que dans le court instant, dans la petite fraction de la période pendant laquelle il est en contact avec le transformateur: dans le reste de la période, il n'y a pas de source d'énergie en circuit qui puisse faire claquer le câble. Le câble ne claquera qu'au moment où il sera en communication avec le transformateur, et encore, s'il y a eu un commencement de déformation, il faut que le transformateur commence à élever de nouveau la tension dans le câble à une valeur convenable avant de le faire claquer.*

Cela suffit peut-être à expliquer pourquoi M. Delon a trouvé qu'il faut une tension redressée 3-4-5 fois la tension efficace d'un courant alternatif pour avoir le même effet sur le câble.

Ce coefficient implique un facteur 1,4, qui est le rapport entre la tension maxima et la tension efficace: mais il y a un autre facteur qui est une fonction du temps pendant lequel le circuit du transformateur est coupé. De sorte qu'il me semble que, en changeant les appareils et les conditions d'essai, on risque de changer aussi le coefficient de M. Delon.

Je désire encore demander à M. Delon s'il n'a pas remarqué la production de courants oscillatoires à haute fréquence, dans ce redresseur.

Digitized by Google

M. J. DELON. — *Non, on ne voit pas de traces de ces courants dans les oscillogrammes.*

M. E. JONA. — *Mais l'oscillographe ne peut pas déceler des courants à haute fréquence. J'ai fait moi aussi quelques essais avec un redresseur tournant, et j'ai trouvé qu'il se produit quelque fois des courants à haute fréquence.*

M. J. DELON *dit qu'avec le type de transformateur qu'il emploie, fait exprès pour ces essais, de petites dimensions, avec peu de fer et beaucoup de cuivre, il ne se produit pas de courant à haute fréquence.*

M. L. LICHTENSTEIN (Berlin). — *Communique qu'il a eu occasion de faire quelques essais avec le redresseur de M. Delon, et que les résultats ont été très satisfaisants. Cependant il est d'avis qu'il serait à conseiller d'augmenter un peu la puissance du transformateur. M. Delon emploie des transformateurs de 5 K. V. A.: il propose de porter cette puissance a 15 K. V. A. environ.*

M. E. JONA de Milan (par lettre):

" *Supposons que l'on ait à essayer un réseau triphasé de 100 Km. à la tension de 30.000 volts alternatifs. Il faudrait employer un transformateur qui puisse donner le courant de charge correspondant: disons 150-200 ampères sous 30.000 Volts, ou bien fractionner le réseau. Avec le redresseur synchrone on pourra employer un transformateur bien moins puissant, car il n'y a pas de courant de charge; mais si nous acceptons le coëfficient 4 de M. Delon il faudra un transformateur de 90.000 volts et un redresseur qui puisse travailler à cette tension. C'est une remarque à ajouter à celles que j'ai faites pendant la discussion* ".

M. J. DELON de Lyon (par lettre):

" *Une inexactitude s'est glissée dans le calcul qui sert à Monsieur E. Jona à appuyer la remarpue contenue dans sa lettre.*

" *En effet, reprenons le même exemple d'un réseau que l'on devrait essayer à 30,000 Volts alternatifs.*

" *Pour l'essayer sous tension continue avec mon appareil il faudrait que celui-ci puisse donner 120,000 Volts si nous admettons le coefficient 4 choisi par Monsieur E. Jona. Comme mon redresseur double donne une différence de potentiel continue égale à 2.8 la différence de potentiel alternative dont on dispose, il suffit que le transformateur employé puisse donner* $\frac{120{,}000}{2{,}8} = 42{,}800$ *Volts et non pas 90,000 comme le dit Monsieur E. Jona.*

" *Dans ce qui précède, nous avons admis le coefficient 4 comme rapport entre la tension alternative et la tension continue qui sont susceptibles de produire les mêmes effets disruptifs dans un câble isolé au papier*

Digitized by Google

imprégné. Or, les expériences relatées par Messieurs Laporte et de la Gorce dans le N° de janvier 1912 du Bulletin de la Société Internationale des Électriciens *ont montré que l'on peut très bien se contenter du coefficient 3, et si l'on reprend le calcul avec ce nouveau coefficient, on arrive à 32,000 volts comme valeur de la différence de potentiel efficace du transformateur de* quelques kilowatts *nécessaire à l'essai en continu, alors que, pour faire cet essai en alternatif, il aurait fallu 30,000 volts et 150-200 ampères. La différence apparaît ainsi nettement* „.

Digitized by Google

Ueber einige neuere Versuche und Erfahrungen mit Hochspannungskabeln.

Ing. Dr. Phil. Leon Lichtenstein (Berlin)

In einem auf dem Verbandstage Deutscher Elektrotechniker in Braunschweig im Jahre 1910 gehaltenen Vortrage (1), sowie in einem vor einigen Monaten in der Elektrotechnischen Zeitschrift erschienenen Aufsatze (2) habe ich einige Ergebnisse der in dem Laboratorium des Kabelwerkes Nonnendamm der Siemens-Schuckertwerke ausgeführten Versuche veröffentlicht. Ich gestatte mir jetzt, an jene Veröffentlichungen einige weitere Mitteilungen anzuknüpfen. Zuvor möchte ich mit wenigen Worten auf die eigentliche Veranlassung und die Anlage dieser Untersuchungen eingehen.

Es sind schon mehrere Jahre her, dass das Kabelwerk Nonnendamm der Siemens-Schuckertwerke sich die Aufgabe gestellt hatte, betriebssichere Hochspannungskabel für 40.000 bis 60.000 Volt Betriebsspannung zu schaffen. In der richtigen Erwägung der Tatsache, dass ein solches Problem nur nach einer gründlichen Erforschung der sich in einem Hochspannungskabel abspielenden physikalischen Vorgänge bewältigt werden kann, ist von dem Kabelwerk Nonnendamm ein mit allen modernen

(1) *Ueber die neuesten Fortschritte in der Fabrikation der Hochspannungskabel,* gedruckt in der " E. T. Z. „, 1910.

(2) *Ueber den gegenwärtigen Stand und die nächsten Aufgaben der Hochspannungskabeltechnik,* " E. T. Z. „, 1911, Heft 9.

Digitized by Google

Hilfsmitteln ausgestattetes Laboratorium eingerichtet worden (1). In diesem werden nun systematische experimentelle Bestimmungen im grossen Massstabe ausgeführt. Ich verweise hierüber auf die bereits zitierten Arbeiten, auf meinen Aufsatz " Versuche zur Bestimmung der Kabelerwärmung „, E. T. Z. 1909, Heft 17, und auf die Arbeit von Herrn M. Höchstädter " die dielektrischen Eigenschaften moderner Hochspannungskabel mit Rücksicht auf die Verwendung von Kabeln für Spannungen über 20.000 Volt „ E. T. Z. 1910, Heft 19 bis 22. Ich hoffe, auch in der Zukunft in der Lage zu sein, die Ergebnisse weiterer Studien der Oeffentlichkeit zu übergeben.

Wird ein blankes Starkstromkabel mit Wechselstrom oder Drehstrom betrieben, so entstehen infolge der Stromverdrängung in den Leitern und infolge der Wirbelströme in dem Bleimantel zusätzliche Energieverluste. Zu diesen Verlusten gesellen sich bei armierten Kabeln die weiteren Verluste in der Band- oder Drahtarmierung infolge der magnetischen Hysteresis. Bei Hochspannung tritt, wie man weiss, überdies eine Energieumwandlung in dem Kabeldielektrikum hinzu. Beschäftigen wir uns zunächst mit den Verlusten, die von dem Strome in dem Kabelleitern allein abhängen.

Bekanntlich sind die Hysteresisverluste in der Armierung von Einfachkabeln bei Wechselstrom verhältnismässig gross. Sie fallen so schwer ins Gewicht, dass die Verwendung der Kabel dieser Art sich in der Regel sowohl aus technischen als auch aus rein wirtschaftlichen Gründen verbietet (2). Dass aber auch bei verseilten Dreifachkabeln die Verluste im Eisenmantel, namentlich bei grossen Leiterquerschnitten, nicht unmerklich sind, dürfte weniger bekannt sein.

In einer in den " Atti d. Associaz. Elettrotecnica Italiana „, 1910, Heft 4, veröffentlichten Abhandlung gibt Herr L. Emanueli die Werte des effektiven Widerstandes verseilter Dreifachkabel mit Kupferleitern infolge der zusätzlichen Verluste in den Leitern,

---

(1) Vergl. meinen Aufsatz *Die Hochspannungsprüfanlagen der Kabelfabrik Nonnendamm der Siemens Schuckertwerke* " Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen „, 1908, Heft 11 und 12. Bei Gelegenheit der Verlegung des Kabelwerkes nach Berlin-Gartenfeld werden übrigens alle Prüfanlagen und das Laboratorium beträchtlich vergrössert. Darüber hoffe ich später genauere Mitteilungen machen zu können.

(2) Man vergleiche hierüber die weiteren Ausführungen dieser Arbeit.

Digitized by Google

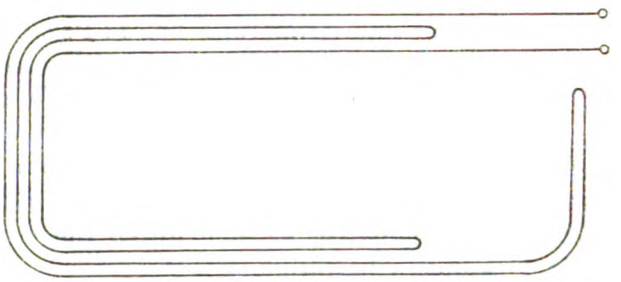


Abb. 1.

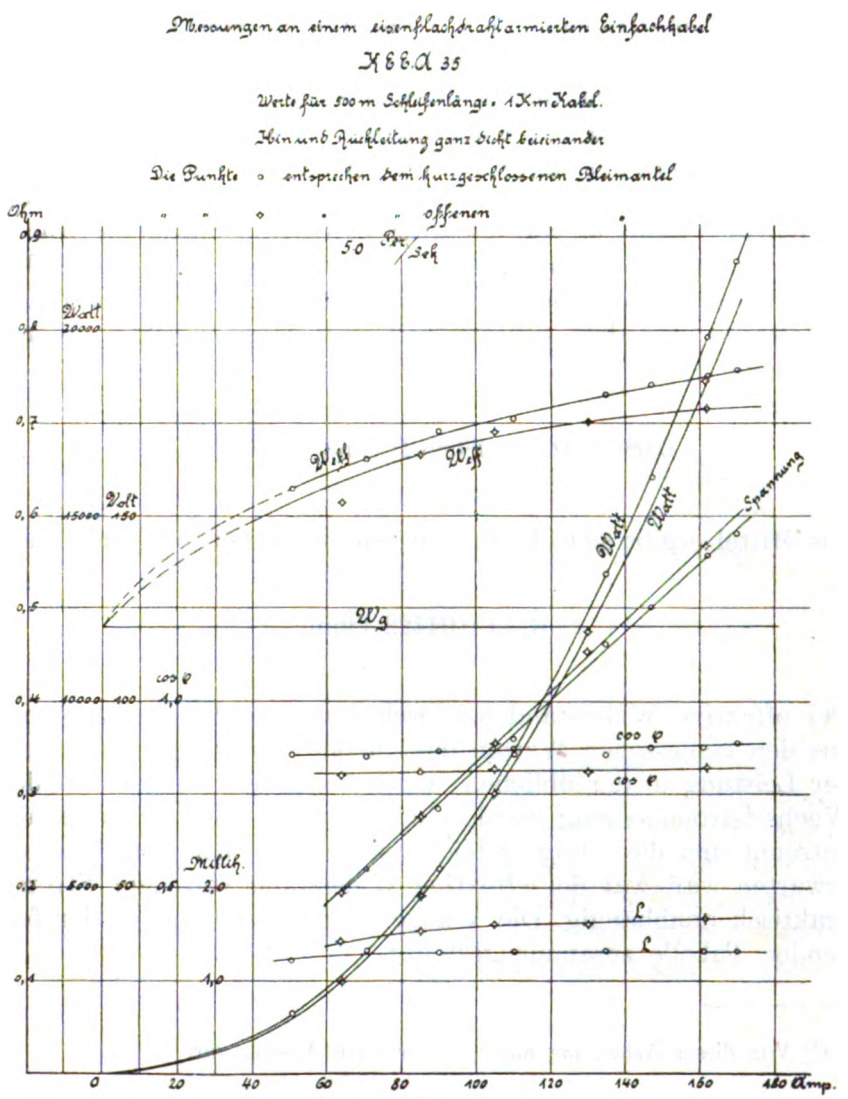


Abb. 2.

Digitized by Google

dem Bleimantel und in der Armierung bei 42 Per./Sek. an. (1). Das Verhältnis des effektiven Widerstandes bei Drehstrom von 50 Per./Sek. zu dem mit Gleichstrom gemessenen Widerstande ergibt sich hieraus bei 300 qmm. Leiterquerschnitt und blanken Kabeln zu etwa 1,12, bei armierten Kabeln zu etwa 1,22. Bei 600 qmm. sind die entsprechenden Werte bereits gleich rund 1,47 und 1,78. Diese Ergebnisse wurden durch die sogleich zu besprechenden Messungen bestätigt.

Sechs Fabrikationslängen des Kabels Type KBA 3×380 qmm. sektorförmig für 700 Volt wurden hintereinander geschaltet, sodass für die Messung eine Gesamtlänge von 995 mtr. zur Verfügung stand. Die Verbindungen wurden durch Schraubhülsen hergestellt, die, um den Uebergangswiderstand möglichst zu reduzieren, überdies mit englischem Zinn ausgegossen wurden. An einem Ende der Kabelstrecke wurden die drei Adern kurzgeschlossen. Hierbei wurden zwei Adern durch eine Schraubhülse verbunden, während von der dritten Ader die einzelnen Drähte paarweise um die Schraubhülse gelegt und verdrillt wurden. Das Ganze wurde dann noch mit Zinn vergossen. Der Gleichstromwiderstand der drei Stromschleifern betrug bei 11° C. entsprechend

$$0{,}08686\ \Omega, \quad 0{,}08688\ \Omega \text{ und } 0{,}08687\ \Omega.$$

Als Mittel ergibt sich daraus für eine Ader bei 15° C. der Wert

$$R_{\gamma} = 0{,}04422 \text{ Ohm.}$$

Der effektive Widerstand bei Drehstrom und Wechselstrom ist aus den gemessenen Werten des Stromes, der Spannung und der Leistung in der üblichen Weise berechnet worden. Bei der Wechselstrommessung wurde eine Ader vom Kurzschlusspunkt getrennt und die übrig gebliebene Schleife belastet. Wie zu erwarten war, war der effektive Widerstand von dem Strome praktisch unabhängig. Die Versuchsergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

---

(1) Von dieser Arbeit lag mir leider nur ein Auszug vor.

Digitized by Google

No.	Stromart	Frequenz ν Per/Sek.	Der effektive Widerstand pro Ader bei 15° C. R_w Ohm	$\frac{R_w}{R_g}$	Selbstinduktivität L Henry/Km.	Bemerkungen
1	Drehstrom	50	0,0580	1,31	3.90×10^{-4}	Bleimäntel nicht verbunden
2	Drehstrom	50	0,0588	1,329	3.90×10^{-4}	Bleimäntel mittels eines Kupferleiters von 70 qmm miteinander verbunden
3	Drehstrom	25	0,04843	1,095	4.3×10^{-4}	Bleimäntel wie unter (2) verbunden
4	Wechselstrom	50	0,0594	1,343	4.56×10^{-4}	Bleimäntel nicht verbunden
5	Wechselstrom	50	0,0603	1,363	4.54×10^{-4}	Bleimäntel wie unter (2) verbunden

Die Werte der vorletzten Kolonne sind aus der Formel

$$L = \frac{E \sin \varphi}{2 \pi \nu J l},$$

in der, wie üblich, E die Spannung zwischen zwei stromführenden Leitern, J den Strom, φ die Phasenverschiebung, l die Kabellänge = 995 mtr. bezeichnet, berechnet wurden. Diese Werte sind, wie zu erwarten war, etwas grösser als die Werte, welche die Rechnung für ein nicht armiertes Kabel mit runden Leitern von 380 qmm. Querschnitt und denselben Isolationsstärken wie die untersuchten Kabel ergibt. Die bekannten Formeln ergeben entsprechend

$3{,}63 \times 10^{-4}$ und $4{,}2 \times 10^{-4}$ Henry/Km.

Digitized by Google

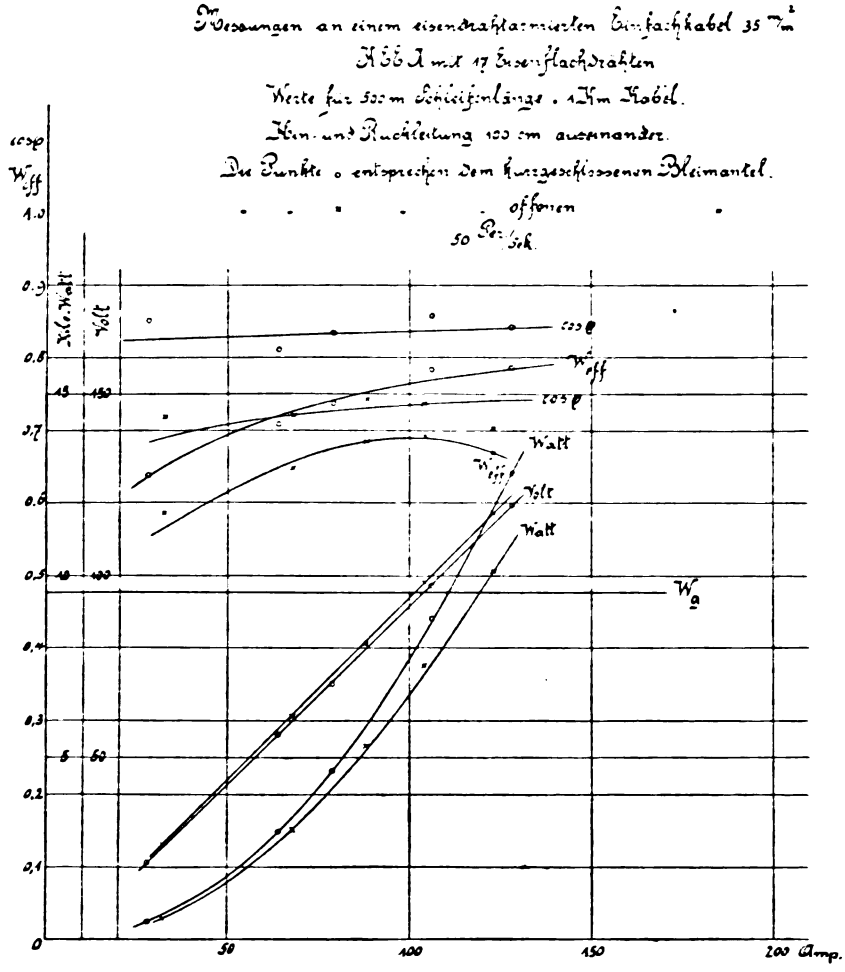


Abb. 3.

Digitized by Google

Die Widerstandszunahme bei 25 Per./Sek. beträgt rund 9,5 %, bei 50 Per./Sek. unter sonst gleichen Bedingungen etwa 32,9 %, d. h. nahezu viermal so viel. Aus den Angaben des Herrn Emanueli ergibt sich hierfür der Wert von 34 %. Die Uebereinstimmung ist als sehr zufriedenstellend zu bezeichnen.

Um festzustellen, welcher Teil der zusätzlichen Verluste durch die Hysteresis und etwaige Wirbelströme in der Armierung bedingt ist, ist ein 343 mtr. langes Kabel der Type KA 3×310 qmm. (sektorförmig) für 700 Volt in genau derselben Weise wie vorhin untersucht worden. Nachdem dann das Kabel zerschnitten worden ist, und ein 130 mtr. langer Teil davon die normale Doppelbandarmatur erhalten hatte, sind an jenem Teile die Kurzschlussmessungen wiederholt worden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle enthalten:

No.	Stromart	Frequenz ν Per/Sek.	$\frac{R_{sc}}{R_g}$	Selbstinduktivität pro 1 Km. Henry/km.	Bemerkungen
1	Drehstrom	50	1,106	$4{,}05 \times 10^{-4}$	blank
2	Wechselstrom	50	1,105	$4{,}64 \times 10^{-4}$	blank
3	Drehstrom	50	1,180	$4{,}50 \times 10^{-4}$	armiert
4	Wechselstrom	50	1,184	$5{,}22 \times 10^{-4}$	armiert

Auch bei diesen Messungen war die Zunahme des Widerstandes von der Stromstärke praktisch unabhängig. Von den 18 % Widerstandszunahme bei Drehstrom sind 7,4 % bedingt durch die Hysteresis und die Wirbelströme in der Armatur, die übrigen 10 % verteilen sich auf die Wirbelströme im Bleimantel und die Stromverdrängung in den Kupferleitern. Eine Trennung dieses letzten Teils liess sich bei dem vorliegenden Versuche nicht durchführen, da es nicht möglich war, eine Kurzschlussmessung an der Seele allein auszuführen. Dies gelang später bei einem anderen Kabel der Type KBA 3×310 (sektorförmig) für 700 Volt. Die Widerstandszunahme, am blanken Kabel gemessen, betrug dort etwa 11 %, diejenige der Kabelseele allein etwa 7,5 %. Die zusätzlichen Verluste am armierten Kabel KBA 3×310 würden sich demnach wie folgt verteilen:

Digitized by Google

rund 8 % durch die Hautwirkung im Kupfer,
„ 3 % „ „ Wirbelströme im Blei,
„ 8 % „ „ Hysteresis und die Wirbelströme in der Armierung.

Wie ersichtlich, ist die Widerstandszunahme bei grossen Kupferquerschnitten, selbst bei blanken Dreifachkabeln nicht mehr belanglos. Bei blanken Einfachkabeln, wo die Kompensation des magnetischen Feldes im Bleimantel fortfällt, dürften die Verluste, namentlich diejenigen durch die Wirbelströme in dem Bleimantel noch erheblich grösser ausfallen. Für die besonders hohen Spannungen kommen nun zur Zeit in erster Linie blanke Einfachkabel in Frage. Bei langen Kraftübertragungen und grossen zu übertragenden Leistungen wird man von selbst auf grosse Leiterquerschnitte geführt. Aus allen diesen Gründen erschien es nicht unwichtig, über die hierbei zu erwartenden Energieverluste Gewissheit zu erlangen.

Für die folgenden Messungen stand ein Kabel der Type KB 500 qmm. für 700 Volt von 755 mtr. Länge zur Verfügung. Dieses ist auf dem Hofe der Fabrik zu einer Schleife derart ausgelegt worden, dass die Hin und die Rückleitung unmittelbar nebeneinander lagen. Die Schleifenbreite war also ungefähr gleich dem Kabeldurchmesser. Die beschränkten Raumverhältnisse gestatteten nicht, die ganze Schleife in einer geraden Linie anzuordnen, es wurde deshalb ein Teil der Schleife wieder rückwärts verlegt, sodass auf dem grössten Teil der Länge vier Kabel, wie auf der Abb. 1 angedeutet, parallel lagen.

Die Konstruktionsdaten des Kabels waren, wie folgt:

Durchmesser des Kupferleiters . . .	29,1	mm.
„ der Kabelseele	34,9	„
Aussendurchmesser des Bleimantels .	40,0	„

Gemessen wurden, wie üblich, Strom, Spannung, Leistung und Frequenz.

Die Schaltung war so getroffen, dass überdies jederzeit der Gleichstromwiderstand des Kupferleiters und damit auch seine Temperatur bestimmt werden konnte. Alle elektrischen Messungen sind mit den bekannten Präzisionsinstrumenten von Siemens & Halske ausgeführt worden. Zur Bestimmung der Frequenz diente ein Frequenzmesser von Hartmann & Braun. Die Versuche sind mit Stromstärken bis 200 Amp. und mit 51 und

Digitized by Google

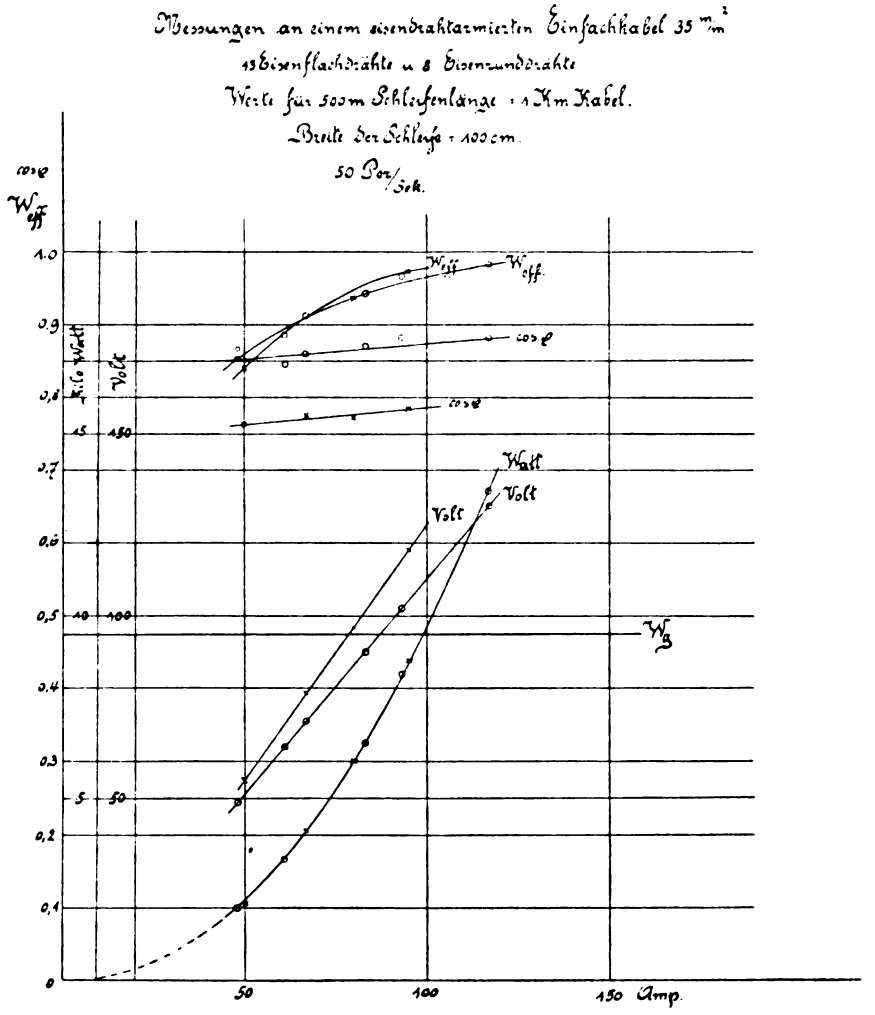


Abb. 4.

Digitized by Google

32,5 Perioden/Sekunde ausgeführt worden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle enthalten:

Frequenz Per/Sek.	Strom J Amp.	Kurzschluss-spannung E Volt	Verbrauch W Watt	Effektiver Widerstand $R_w = \frac{W}{J^2}$	Gleichstrom Widerstand R_g Ohm	Leistungs-faktor $\cos\varphi$	Selbstinduktivität pro Kilometer L Henry/Km.
32,5	47	2,4	67	0,0304	0,0274	0,594	$5{,}33 \times 10^{-4}$
„	59,3	3,1	109	0,0310		0,594	5,44
„	78,2	4,1	182	0,0298	0,0275	0,568	5,58
„	124,2	6,5	470	0,0304		0,582	5,52
„	148,2	7,83	670	0,0304	0,0276	0,577	5,58
„	175,4	9,29	932	0,0303		0,572	5,62
„	189,8	9,99	1090	0,0303	0,0274	0,575	5,58
51,0	52,3	3,94	96	0,0351	0,0276	0,466	5,53
„	70,1	5,3	170	0,0346		0,458	5,56
„	96	7,21	318	0,0345	0,02775	0,459	5,52
„	126	9,57	556	0,0350		0,461	5,57
„	151,8	11,58	800	0,0347	0,0277	0,456	5,61
„	174,2	13,33	1048	0,0345		0,452	5,04
„	193,8	14,38	1286	0,0342	0,02775	0,462	5,45

Die Mittelwerte sind:

bei 32,5 Per./Sek.

$$R_g = 0{,}0275 \text{ Ohm}, \quad R_w = 0{,}03037 \text{ Ohm}, \quad \frac{R_w}{R_g} = 1{,}102;$$

bei 51 Per./Sek.

$$R_g = 0{,}0277 \text{ Ohm}, \quad R_w = 0{,}03466 \text{ Ohm}, \quad \frac{R_w}{R_g} = 1{,}25.$$

Wie aus der vorstehenden Tabelle ersichtlich, ist die Widerstandszunahme bei blanken Einleiterkabeln beim Betriebe mit Wechselstrom von der Stromstärke praktisch unabhängig. Sie hängt jedoch wesentlich von der Frequenz ab. Nimmt man an, dass die zusätzlichen Verluste der x-ten Potenz der Frequenz proportional sind, so erhält man zur Bestimmung der Zahl x die Beziehung

$$\left(\frac{51}{32{,}5}\right)^x = \frac{25}{10{,}2}, \quad x = \frac{\log 2{,}47}{\log 1{,}57} = 1{,}99.$$

Digitized by Google

Die Widerstandszunahme ist also dem Quadrate der Frequenz proportional.

Bei einer Frequenz von 15 Perioden pro Sekunde, wie sie für Wechselstrombahnbetriebe hauptsächlich in Frage kommt, wird demnach die Widerstandszunahme an einem 500 qmm. starken blanken Einfachkabel

$$25 \cdot \left(\frac{15}{51}\right)^2 = 2{,}17\ \%$$

betragen. Hätte man das untersuchte Kabel in einer weiten Schleife ausgelegt, so würde die Widerstandszunahme voraussichtlich etwas grösser sein; beträchtlich könnte der Unterschied jedenfalls kaum ausfallen.

Die Ergebnisse der im obigen besprochenen Versuche sind deshalb von einer grossen praktischen Bedeutung, weil eine Widerstandszunahme von auch nur 25 % bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Anlage stets eine nicht unbeträchtliche Rolle spielen wird, dies um so mehr, als neben den vom wechselnden magnetischen Felde abhängigen Verlusten noch diejenigen durch dielektrische Hysteresis zu betrachten sind.

Sehr günstig stellen sich die Verhältnisse bei 15 Per./Sek. Die Widerstandszunahme ist hierbei praktisch belanglos; ein Argument mehr zu Gunsten niedriger Frequenzen bei Wechselstrombahnbetrieben, bei welchen man hauptsächlich mit Wechselstrom, somit mit blanken Einfachkabeln zu tun hat.

Wie bereits erwähnt, kommen für die Kraftübertragungen mit besonders hohen Spannungen in erster Linie Einfachkabel in Betracht. Diese Kabel mit gewöhnlicher Eisenarmierung auszustatten, geht bekanntlich infolge der grossen Hysteresisverluste im Eisen nicht an; die Verlegung nach dem englischen "Solid System" ist aber sehr kostspielig und hat mitunter unüberwindliche Unzuträglichkeiten zur Folge.

Zur Klarstellung der hier obwaltenden Verhältnisse sind in dem Laboratorium des Kabelwerkes der Siemens-Schuckertwerke vor einiger Zeit ausgedehnte Versuche angestellt worden. Hierüber habe ich bereits in meinem Braunschweiger Vortrage einiges mitgeteilt. Ich erlaube mir jetzt auf diesen Gegenstand zurückzukommen, um die Ergebnisse einiger neuerer Versuche zu besprechen.

Zunächst einige zusammenfassende Worte über die bereits früher mitgeteilten Resultate.

Digitized by Google

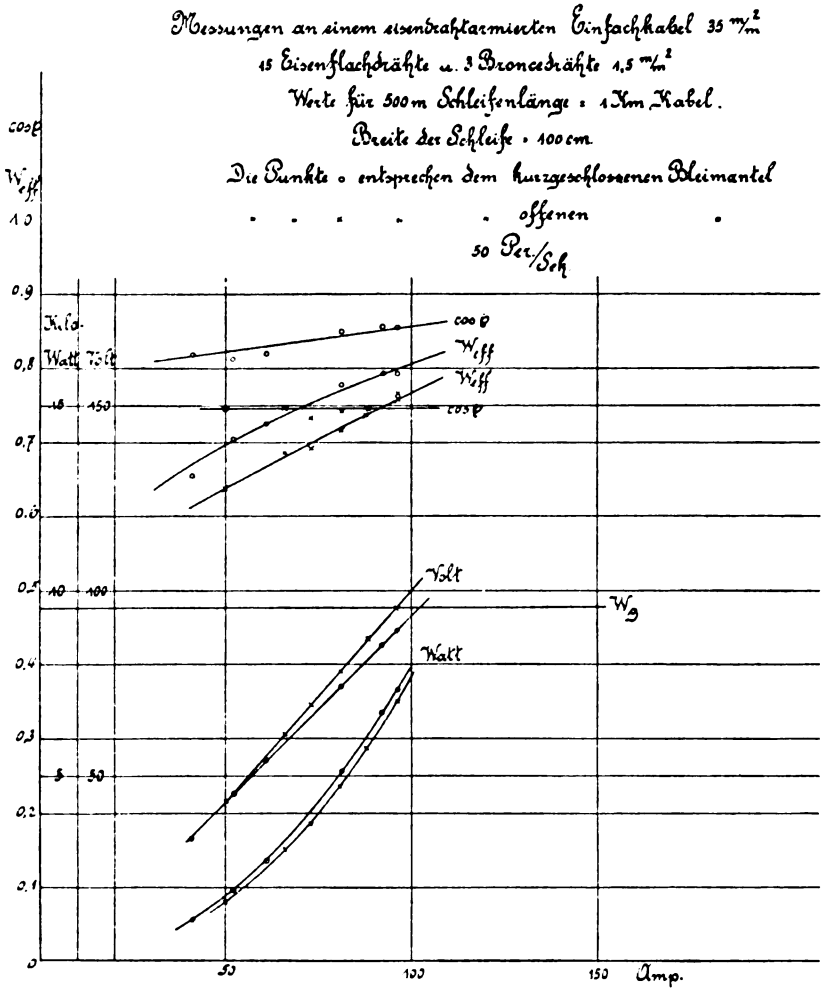


Abb. 5.

Digitized by Google

Um den Einfluss eines mehr oder weniger vollständigen magnetischen Schlusses durch die Armierung festzustellen, sind in der üblichen Weise Kurzschlussversuche an vier etwa 75 meter langen verschiedenartig armierten, im übrigen ganz gleichen Einfachkabeln angestellt worden. Der Leiter bestand in allen Fällen aus einer Kupferlitze von 35 qmm. Querschnitt, die Isolationsstärke betrug rund 5 mm., die Stärke des Bleimantels etwa 2,3 mm. Das Kabel I war blank, das Kabel II war mit 18 Eisendrähten von 5,5 m/m Durchmesser armiert. Die Armierung der Kabel III und IV bestand entsprechend aus 15 Eisen- und 3 Kupferdrähten und 9 Eisen- und 9 Kupferdrähten von je 5,5 mm. Durchmesser. Eisen- und Kupferdrähte waren gleichmässig im Kreise verteilt. Die Frequenz betrug bei den meisten damaligen Messungen 50 Perioden/Sekunde. Der effektive Widerstand $= \frac{\text{Energieverbrauch}}{(\text{Strom})^2}$ war bei 100 Amp.

beim Kabel IV um 15 %,
„ „ III „ 28 %,
„ „ II „ 37 %

grösser als der Ohm'sche Widerstand. Beim blanken Kabel war der effektive Widerstand von dem Gleichstromwiderstand nicht merklich verschieden.

Neben den Messungen bei 50 Perioden/Sekunde sind damals schon einige Bestimmungen mit 25 Per./Sek. ausgeführt worden. Mit der Erniedrigung der Frequenz werden die Verhältnisse, wie zu erwarten war, günstiger. Bei 124 Amp. war der Wattverlust am Kabel II bei 25 Per./Sek. um 27 % grösser als bei Gleichstrom, während bei 50 Per./Sek. dieser Ueberschuss rund 39 % betrug.

Nun die Schlussfolgerungen: Zunächst ist zu bemerken, dass die Verhältnisse sich um so ungünstiger gestalten, je grösser der Kupferquerschnitt ist. In der Tat ist der Verlust in der Armierung in der Hauptsache nur von dem Strome abhängig, somit bei grossen Kupferquerschnitten nahezu ebenso gross, wie bei kleinen, der Ohm'sche Verlust ist aber bei festgehaltenem Strome dem Leiterquerschnitt umgekehrt, das Verhältnis der beiden Verluste somit dem Querschnitte direkt proportional. Bei einem Kabel von 95 qmm. Leiterquerschnitt, das wie das Kabel II

Digitized by Google

armiert ist, würde die prozentuale Zunahme des effektiven Widerstandes nicht 37 % wie vorhin, sondern $\frac{95}{35} \times 37$ % d. h. rund 100 % ausmachen.

Die armierten Einfachkabel, selbst wenn in der Armierung die Drähte aus Eisen und Kupfer, oder einem anderen unmagnetischen Metalle abwechseln, sind somit nur mit grosser Vorsicht zu gebrauchen. In manchen Fällen spielt indessen der erwähnte zusätzliche Verlust keine Rolle, namentlich, wenn ein verhältnismässig kurzes Stück eines armierten Kabels, etwa bei der Durchkreuzung von Flüssen u. dgl., in eine längere Strecke blank verlegter Kabel eingebaut werden soll. In solchen Fällen ist gegen die Verwendung von armierten Kabeln, am besten in der Ausführung IV, nichts einzuwenden.

Die soeben besprochenenen Ergebnisse sind durch spätere Messungen, über die nunmehr referiert werden soll, bestätigt worden.

Es wurden zunächst 4 Einfachkabel von 35 qmm. Kupferquerschnitt, 4,5 mm. Isolation- und etwa 2,3 mm. Bleimantelstärke, verschiedenartig armiert, untersucht.

Das Kabel	V	war	mit	18	Flacheisendrähten,
„ „	VI	„	„	17	eben solchen Drähten,
„ „	VII	„	„	13	Eisenflach- und 8 Eisenrunddrähten von 1.75 mm. Durchmesser,
„ „	VIII	„	„	15	Flacheisen- und 3 Bronzedrähten von 1,52 mm. Durchmesser

armiert. Eisen- und Bronzedrähte der Armierung waren gleichmässig im Kreise verteilt.

Die Messungen wurden in der üblichen Weise ausgeführt. Die Ergebnisse, umgerechnet für eine Schleife von 500 mtr. Länge, d. h. für 1000 mtr. Gesamtkabellänge sind in den Abbildungen 2 bis 5 enthalten.

Der effektive Widerstand war bei 100 Amp. und 50 Per./Sek. beim offenen Bleimantel bei dem Kabel

V	um rund	42 %,
VI	„	45 %,
VII	„	105 %,
VIII	„	63 %

Digitized by Google

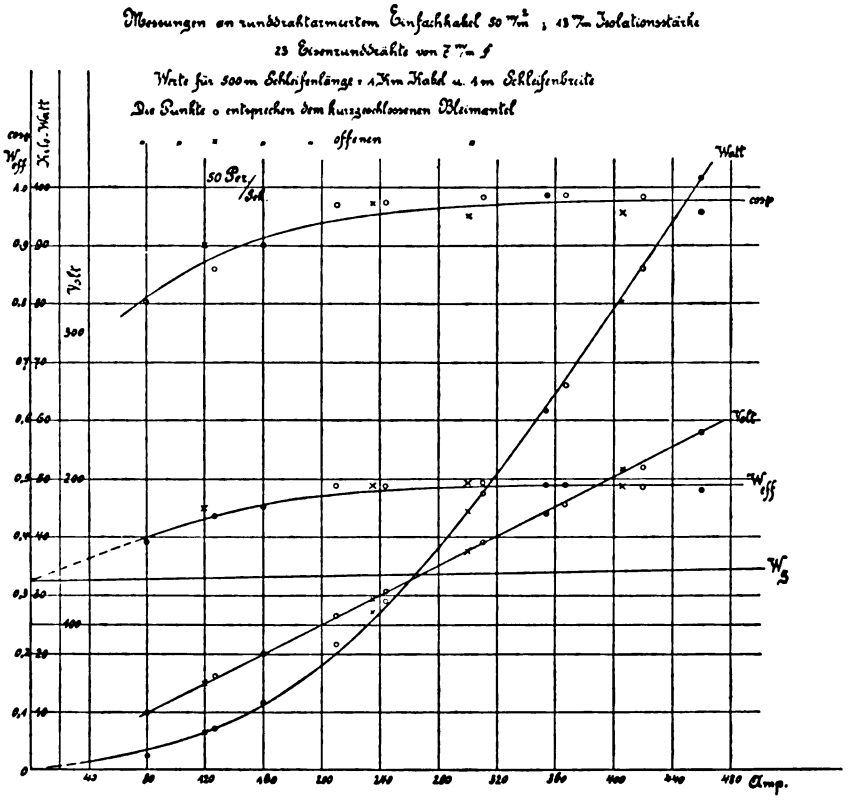


Abb. 6.

Digitized by Google

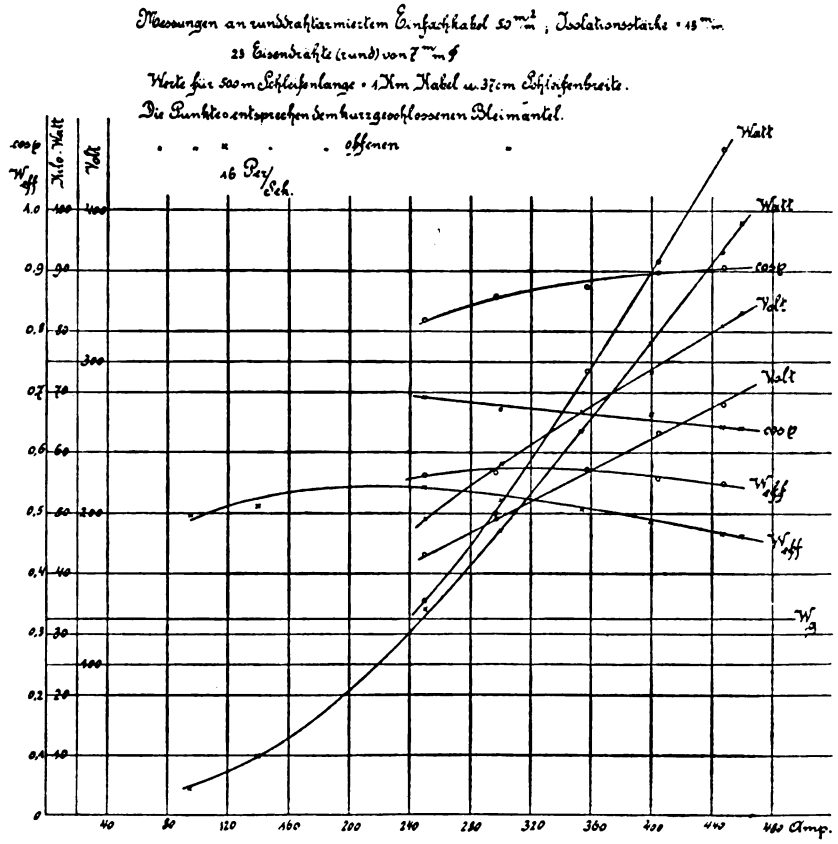


Abb. 7.

Digitized by Google

grösser als der Ohm'sche Widerstand. Hat man die beiden Enden des Bleimantels durch einen Kupferdraht verbunden, so stieg der effektive Widerstand noch um einige Prozente.

Die Ergebnisse dieser Messungen erscheinen insofern etwas befremdend, als man jedenfalls bei dem Kabel VI und namentlich bei dem Kabel VIII einen effektiven Widerstand kleiner als bei dem Kabel V hätte erwarten sollen. Indessen spielen im vorliegenden Falle Faktoren, die, wie der grössere oder geringere Druck, mit dem sich die einzelnen Drähte aneinanderlegen, von den Zufälligkeiten der Fabrikation abhängen und sich nicht vorausbestimmen lassen, eine wichtige Rolle.

Wie aus der vorstehenden Tabelle besonders drastisch hervorgeht, ist ein armiertes Einfachkabel entschieden ein sehr unsicheres Konstruktionselement.

Die bis jetzt untersuchten Kabel waren verhältnismässig schwach isolierte Kabel. Um festzustellen, wie sich ein mit schwerem Runddraht armiertes Hochspannungseinfachkabel verhält, wurden einige Messungen mit einem Kabel KEEA 50 mit 13 mm. Isolation und starker Flussarmierung aus 23 Eisenrunddrähten von 7 mm. Durchmesser ausgeführt. Trotzdem die Entfernung der Armierung von dem Stromleiter bei dem vorliegenden Kabel grösser, somit das magnetische Feld in dem Eisen schwächer als bei den bis jetzt untersuchten Kabeln war, könnten die Verluste doch beträchtlich grösser als dort ausfallen, weil ja die Gesamtmasse des Eisens bedeutend grösser war. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der Abbildung 6 enthalten.

Der effektive Widerstand wächst bei 50 Per./Sek. bis zu etwa 200 Amp. mit dem Strome, von nun an nimmt er bis etwa 470 Amp., der höchsten angewandten Stromstärke, merklich ab und beträgt bei 200 Amp. und 470 Amp. entsprechend 168 % und 140 % des Widerstandes beim Gleichstrom. Um dieses Resultat mit den zu Anfang angegebenen Resultaten, denen ja ein Kupferquerschnitt von 35 qmm. zu Grunde liegt, vergleichen zu können, muss man jene Werte entsprechend umrechnen. Man erhält bei 100 Amp. bei dem Kabel IV etwa 53 % Widerstandszunahme gegen etwa 51 % bei dem zuletzt betrachteten Kabel IX.

Es wurde zuletzt an dem Kabel IX eine Versuchsreihe mit 15 Per./Sek. ausgeführt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 7 angegeben. Bei 180 Amp. war der effektive Widerstand um rund 40 % grösser als beim Gleichstrom, gegenüber der Zahl von 66 % bei 50 Per./Sek. Die Erniedrigung der Frequenz hatte

Digitized by Google

also keineswegs eine proportionale Erniedrigung der Ummagnetisierungsverluste zur Folge. Diese Erscheinung dürfte mit der Verteilung des magnetischen Feldes in der Armierung, die sich mit der Frequenz ändert, zusammenhängen.

Die Ergebnisse aller obigen Versuche zusammenfassend, können wir jetzt sagen, dass die Ummagnetisierungsverluste selbst bei 15 Per./Sek. und bei der günstigen schweren Runddrahtarmierung sehr gross ausfallen. Bei Flacheisendrähten, bei denen die Berührung einzelner Drähte meist weit inniger ist, sind die Verluste entsprechend grösser.

In einer vor etwa 2 Jahren veröffentlichten Arbeit habe ich auf Grund eingehender Erwärmungsmessungen eine Belastungstabelle für die im Boden verlegten Dreileiterkabel mit etwa 17 mm. und Einleiterkabel mit etwa 5 mm. Isolationsstärke aufgestellt. Die erste dieser Tabellen habe ich später durch Berücksichtigung der Verluste infolge der dielektrischen Hysteresis vervollständigt. Ich möchte mir nunmehr erlauben, die Ergebnisse einiger Messungen an einem stark isolierten Einfachkabel mitzuteilen.

Es handelte sich hierbei um ein speciell zu Versuchszwecken hergestelltes Kabel der Type KA 61,3 qmm. mit 12 mm. Isolationsstärke. In dem Dielektrikum lag durch einige mm. Papier von dem Bleimantel isoliert, ein dünnes spiralig aufgewundenes Kupferband. Dieses Kupferband spielt bei den Vorgängen der Wärmeleitung, wie leicht ersichtlich, keine nennenswerte Rolle. Das Kabel war in der üblichen Weise in etwa 0,80 m. Tiefe in dem Erdboden verlegt und ist mit Gleichstrom belastet worden. Zur Bestimmung der Erwärmung sind wie gewöhnlich Messungen des Stromes und der Spannung ausgeführt worden. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 8 und 9 enthalten. Die stationäre Uebertemperatur betrug bei 230 Amp. 25,4 Cels. Die Uebertemperaturen verhalten sich, wie zu erwarten, wie die Quadrate der Ströme.

Aus den vorhin erwähnten Tabellen ergibt sich für ein Einfachkabel von 61,5 mm. Kupferquerschnitt bei 5 mm. Isolation ein zulässiger Strom von rund 235 Amp. Dieser Belastung entspricht eine Uebertemperatur von 25° Cels. Wie wir sehen, sind die zulässigen Belastungen der beiden Kabel trotz der grossen Differenz der Isolationsstärken nahezu gleich. Dieses günstige Ergebnis ist vermutlich der Wirkung der grossen abkühlenden Oberfläche des vorliegenden Kabels zuzuschreiben.

Digitized by Google

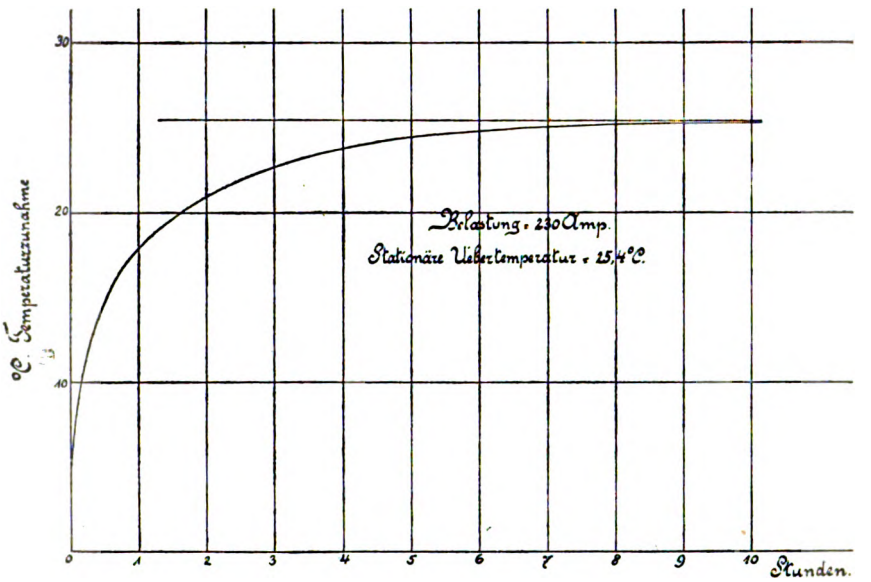


Abb. 8.

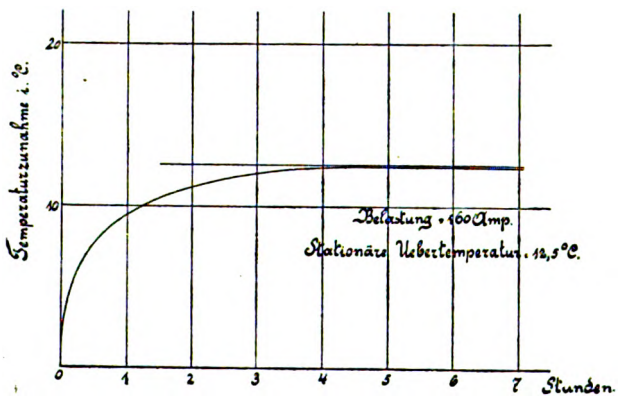


Abb. 9.

Digitized by Google

Das in den Abbildungen 8 und 9 enthaltene Resultat gestattet natürlich nicht, eine vollständige Belastungstabelle für hochisolierte Einfachkabel aufzustellen. Immerhin darf man annehmen, dass die zulässigen Belastungen auch bei anderen Kupferquerschnitten sich nicht wesentlich von den in meinen Tabellen angegebenen Werten unterscheiden werden. Man hat somit nicht zu besorgen, dass sehr stark isolierte Einfachkabel nur verhältnismässig sehr schwach belastet werden dürften.

Ich habe in Laufe unserer Betrachtungen wiederholt von Kraftübertragungen durch Kabel für besonders hohe Spannungen gesprochen, ohne mich darüber geäussert zu haben, bis zu welcher Betriebsspannung die Kabelanlagen überhaupt ausgeführt werden können. Prophezeien ist eine mitunter gefährliche Sache; ich ziehe daher vor, einfach über das tatsächlich Erreichte zu berichten. Ein Fachmann wird sich alsdann leicht eine bestimmte Vorstellung über die Aussichten der Hochspannungskraftübertragungen durch Kabel bilden können.

Kabelanlagen für 25.000 bis 30.000 Volt Drehstrom sind in der letzten Zeit schon etwas fast alltägliches geworden. Bei 13 bis 15 mm. Isolationsstärke Leiter gegen Leiter und Leiter gegen den Bleimantel erreicht man bei verseilten Dreifachkabeln, die hierbei hauptsächlich in Frage kommen, bei den Proben mit kürzeren Kabelstücken Durchschlagsspannungen bis 250.000 Volt und darüber, je nach der Art und der Dauer der Beanspruchung. Man verfügt somit gewiss in allen Fällen über eine völlig ausreichende Betriebssicherheit. Auch bei 35.000 bis 40.000 Volt würde man heutzutage verseilte Drehstromkabel anwenden können. Erfahrungen aus der Praxis liegen hierüber noch nicht vor, da Kraftübertragungen durch verseilte Kabel über 30.000 Volt, wie es scheint, wenigstens in Europa noch nicht ausgeführt worden sind. Von 40.000 Volt an kommen zur Zeit in erster Linie Systeme von Einfachkabeln in Betracht. Ueber die Betriebserfahrungen mit einer Anlage dieser Gattung, übrigens der ersten ihrer Art, möchte ich zum Schluss noch einige nähere Mitteilungen machen.

Es handelt sich um die elektrische Bahnanlage Dessau/Bitterfeld. Die Fahrdrahtspannung dieser Bahn beträgt 10.000 Volt, die Energie wird in der Form von Wechselstrom von 60.000 Volt zugeführt. Als Speiseleitungen sind von der Königlichen Eisenbahn-Direktion Halle auf Vorschlag der Siemens-Schuckertwerke neben der Freileitungen Kabel zugelassen worden; die Aus-

Digitized by Google

führung der Kabelanlage haben die beiden Firmen Siemens-Schuckertwerke und Felten & Guillaume Carlswerk übernommen. Die Länge der Kabelstrecke beträgt 4,5 km. Die Frequenz ist gleich 16,6 Per./Sek. Die Energie wird durch zwei asphaltierte Einfachkabelsysteme übertragen. Die Spannung jedes Leiters gegen den zugehörigen Bleimantel beträgt sonach 30.000 Volt. Nach der Verlegung ist jedes Kabel gegen Erde mit 50.000 Volt 10 Minuten lang geprüft worden.

Nach einem kurzzeitigen Probebetrieb mit 30.000 Volt ist die Anlage seit mehreren Monaten mit 60.000 Volt in vollem Betrieb. Es werden Passagier- und Güterzüge auf der etwa 28 km. langen Strecke Bitterfeld-Dessau elektrisch gefahren. Die Kabel stehen täglich etwa 10 Stunden lang unter voller Spannung, wobei abwechselnd die von der einen, dann die von der anderen Firma gelieferten Kabel während einer Woche allein den Dienst versehen. Trotz den bei einem Bahnbetrieb unvermeidlichen heftigen Belastungsschwankungen und den im Gefolge auftretenden Ueberspannungen sind weder Kabeldurchschläge, noch irgend welche Betriebsstörungen der Kabelanlage bis jetzt vorgekommen. Das Problem der Kraftübertragung durch Kabel mit 60.000 Volt Betriebsspannung ist als gelöst zu betrachten.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

L'auteur présente un rapport sur divers essais expérimentaux, effectués dans ces derniers temps au laboratoire de la fabrique des câbles de la société anonyme Siemens-Schuckert à Berlin-Nonnendamm.

Depuis plusieurs années l'usine s'était proposé de fabriquer des câbles à haute tension pour une tension de régime de 40.000 à 60.000 volts. Pour atteindre ce but, elle a fait toute une série d'études expérimentales, dont quelques résultats sont publiés dans le présent communiqué.

Le point principal était de fixer la consommation d'énergie dépendant du courant pour les câbles à un seul ou à trois conducteurs. Il s'agit des pertes dans le conducteur en cuivre par le skineffet. ou effet pelliculaire, dans la gaîne en plomb par courants de Foucault et dans l'armature en fer par courants de Foucault et hystérésis.

Les câbles à trois conducteurs tordus avaient été examinés en premier lieu. On avait trouvé pour un câble à trois conducteurs tordus avec armature en fer et pour 700 volts de tension de régime, dont les conducteurs étaient de 310 mm² de section, sur un secteur à 50 périodes par seconde:

1. une perte d'environ 8 % par l'effet pelliculaire dans le cuivre;

2. une perte d'environ 3 % par les courants de Foucault dans la gaîne en plomb;

3. une perte d'environ 8 % par courants de Foucault et hystérésis dans l'armature en fer.

Ces pertes additionnelles se rapportent aux pertes Joule du courant continu. Elles ne sont pas sans importance au point de vue économique; elles croissent d'ailleurs simultanément avec l'augmentation de section du conducteur.

Comme il était à prévoir que les pertes dans le cuivre et le plomb

Digitized by Google

seraient très grandes pour les câbles simples de grande section, on avait fait des essais spéciaux avec un câble simple de 500 mm² de section et sans l'armature en fer.

Le diamètre du conducteur toronné en cuivre était de: 29,1 mm.

Le diamètre sous plomb était de: 34,9 mm.

Le diamètre extérieur du câble était de: 40,0 mm.

A 51 périodes par seconde la consommation additionnelle était d'environ 25 %.

A 32,5 périodes par seconde la consommation additionnelle était d'environ 10,2 %.

Elle est pratiquement proportionelle au carré de la fréquence, et serait donc à 15 périodes par seconde seulement d'environ 2,2 %. Considérant qu'à présent les câbles simples sont surtout employés pour la haute tension, et que pour le transport de grandes énergies à une grande distance des sections considérables sont nécessaires, les résultats ci-dessus deviennent très importants. Vu la question économique, une perte de 25 % joue un rôle considérable, d'autant plus que la puissance consommée par hystérésis dans l'isolement du câble doit y être ajoutée. Le pourcentage à 15 périodes par seconde est très favorable. Cette fréquence est employée, comme on le sait, pour les chemins de fer électriques à courant alternatif.

L'auteur rapporte ensuite les essais faits avec les câbles armés à un seul conducteur. Il s'agissait ici des câbles de 35 à 50 mm² de section de cuivre avec un isolement de 5 à 13 mm. d'épaisseur, et dont l'armature consistait soit en fer plat ou en fil de fer, soit enfin en fil de fer et de cuivre. Les essais qui viennent d'être mentionnés confirment les résultats déjà rapportés par l'auteur dans un autre recueil. Les pertes par hystérésis magnétique, même à 15 périodes par seconde, sont tellement élevées que les câbles simples armés doivent toujours être employés avec beaucoup de précaution. Dans le cas où il serait question d'intercaler une longueur relativement courte de câble armé dans une longueur assez considérable de câbles sans armature, par exemple, pour le croisement d'une rivière, on pourrait employer le câble armé sans hésitation.

L'auteur communique enfin quelques données sur le premier transport d'énergie avec câbles pour une tension de régime de 60.000 volts. Il s'agit ici des câbles d'alimentation du chemin de fer électrique Bitterfeld-Dessau. Les câbles d'alimentation de 4,5 Km. de longueur ont d'abord été fournis par la société anonyme Siemens-Schuckert comme câbles asphaltés à un seul conducteur. Bientôt après la maison Felten et Guillaume Carlswerk a posé un câble d'une

Digitized by Google

construction analogue. Ces câbles portent depuis 6 mois, et pendant environ 10 heures par jour, la pleine tension sans qu'aucune interruption de l'exploitation par disruption électrique du câble se soit produite. Le problème du transport de l'énergie par câbles pour une tension de régime de 60.000 volts doit ainsi être considéré comme résolu.

DISCUSSION

M. G. G. Ponti (Turin) *demande si la mesure de la température du câble fut exécutée au thermomètre.*

M. L. Lichtenstein (Berlin) *répond que la température des conducteurs du câble fut calculée d'après l'élévation de la résistance.*

M. J. Delon (Lyon) *informe qu'on va bientôt poser en France un câble triphasé de 2,5 Km. de longueur pour une tension de service de 65.000 volt.*

Digitized by Google

ATTUALI LIMITI
di applicazione dei cavi per energia elettrica.

Ing. Elvio Soleri (Torino).

Premessa.

La tecnica della costruzione dei cavi per correnti ad alta tensione è venuta in cotesti ultimi anni perfezionandosi in modo notevole per corrispondere alla tendenza degli impianti elettrici di aumentare la tensione di esercizio, onde estendere i proprî limiti di applicazione.

Lo studio più intimo dei materiali isolanti, condotto sperimentalmente presso i produttori delle materie prime e presso i costruttori di cavi, ed il perfezionamento dei loro processi di fabbricazione condussero ad elevare la rigidità dielettrica dei materiali isolanti noti e ad adottare nuovi materiali.

Colla scorta di copiosi risultati sperimentali venne meglio conosciuto il comportamento di cotesti materiali isolanti, modificando i criteri che regolavano prima cotesta fabbricazione. Ad esempio, è stato posto in chiaro ed è ormai indiscusso che la rigidità dielettrica del materiale isolante non è in relazione col suo isolamento specifico e che anzi nei cavi ad isolamento in carta impregnata è migliore pratica, allo stato odierno della tecnologia dei materiali isolanti, di non spingere la resistenza di isolamento a quei limiti che parevano un giorno necessari, i quali impediscono di realizzare quella resistenza alla perforazione, che è possibile di ottenere con materiali isolanti di minore isolamento specifico.

I due materiali isolanti tipici: la gomma e la carta impre-

Digitized by Google

gnata, sono stati portati a rigidità dielettriche alquanto superiori a quelle già loro caratteristiche. Si è però perfezionata in modo speciale la fabbricazione dei cavi in carta impregnata.

Mentre venivano indicate come rigidità dielettriche medie e massime della carta impregnata rispettivamente 16.000 e 20.000 volt, possiamo ritenere che oggi tali rigidità dielettriche si possono ottenere dell'ordine di 25.000 e 30.000 volt.

Il tipo di cavo ad isolamento in carta impregnata ha preso per i cavi a bassa ed a media tensione il sopravvento sul cavo ad isolamento in gomma. Cotesto ultimo isolante è stato superato non solo per quanto riguarda la sua rigidità dielettrica, che è dell'ordine di 20.000 volt e per tipi speciali di 25.000 volt; ma pure per quanto riflette la sicurezza del cavo, potendosi raggiungere una maggiore omogenèità mediante la carta impregnata, la cui formazione è più regolabile dalla tecnica. I rapporti economici sono poi favorevoli al cavo in carta impregnata.

Possiamo quindi ritenere che l'uso della gomma è limitato ai numerosi casi speciali in cui le proprietà di cotesto materiale sono necessarie ed alla costruzione dei cavi ad altissima tensione, in cui si utilizzano le caratteristiche di costante dielettrica facilmente variabile, di cotesto materiale.

È da segnalarsi che si viene introducendo come materiale isolante la tela verniciata, il cui uso è per ora da limitarsi a quei casi speciali in cui si richiede una particolare flessibilità del cavo. Giudicando però dai risultati ottenuti colle tele verniciate per usi relativi alle costruzioni elettromeccaniche, è da prevedersi la futura convenienza di adottare cotesto materiale isolante per la costruzione dei cavi ad altissima tensione.

La tecnica della fabbricazione dei cavi ha altresì progredito nella potenza dei mezzi di fabbricazione, raggiungendo limiti maggiori nelle dimensioni dei cavi, come producendo tipi nuovi, a diversa disposizione di conduttori, con armature specialmente foggiate, atte a realizzare scopi vari e per adattarsi alle varie applicazioni di così importante organo degli impianti elettrici. Sono state fatte applicazioni di metalli diversi sia per il conduttore come per gli involucri esterni.

Il più segnalato perfezionamento nella costruzione dei cavi è però da considerarsi quello del più intimo studio del loro calcolo e progetto, che ci permette di affermare essere oramai cotesta tecnica uscita dallo stato di empirismo in cui si svolse

Digitized by Google

lungamente. Per quanto molto sia ancora da fare e parecchi fenomeni siano ancora oscuri, pure lo studio e lo esperimento condotto da scienziati e da tecnici nel campo teorico ed in quello pratico hanno portato un notevole contributo alla conoscenza del comportamento dei materiali isolanti nei cavi, per cui si può ritenere che con una razionale applicazione dei risultati teorici, oggidì il cavo ad alta tensione si può calcolare come una macchina elettrica, non solo nei suoi elementi costruttivi, ma pure nelle sue caratteristiche di funzionamento.

In seguito alle prime trattazioni classiche sulla teoria della ripartizione del potenziale nel dielettrico dei cavi esposte dal Gormann e dal Jona, ed in seguito ai risultati sperimentali, esposti da cotesto ultimo autore, un'ampia discussione si è svolta sull'argomento, numerose esperienze sono state condotte nei gabinetti delle Case costruttrici ed attualmente una ricca letteratura illustra ogni lato di così interessante problema, parte confermando, parte rettificando, le prime deduzioni di indole teorica.

Coteste deduzioni teoriche, pure avendo una sufficiente conferma in quei casi in cui gli elementi tecnologici, impossibili a fissarsi in relazioni matematiche, hanno minore influenza, hanno avuto un temperamento dal risultato delle numerose prove sperimentali, che si sono succedute e sono quindi applicabili al giorno d'oggi in modo sicuro e con coefficienti basati sulle proprietà rigorosamente controllate dei materiali isolanti impiegati.

Nelle officine i laboratori di prova si sono dotati degli apparecchi idonei alle prove ad alta tensione, che hanno servito a riconoscere come la costruzione dei cavi ad alta tensione possa oggidì raggiungere dei limiti veramente estesi, avvicinandosi ai massimi potenziali usati nelle trasmissioni della energia elettrica.

Accanto al perfezionamento nella fabbricazione dei cavi si è contemporaneamente perfezionata la tecnica dei relativi accessori, essenziali per il buon funzionamento delle canalizzazioni sotterranee e per quanto alcuni problemi, tra cui importantissimo quello della protezione dei cavi contro le sopraelevazioni di tensione, siano tuttora in discussione, pure si deve riconoscere che nei sistemi di posa dei cavi e nella formazione degli accessori relativi criteri razionali sono venuti adottandosi, contribuendo ad aumentare la fiducia dei tecnici nell'impiego delle linee elettriche in cavi.

Digitized by Google

Come naturale conseguenza di cotesto sviluppo nella tecnica della fabbricazione dei cavi si è esteso il loro impiego, generalizzandosi per le reti sotterranee nell'interno delle città ed applicandosi talora per linee di alimentazione ad alta tensione.

Tra gli esempi che possono fissare gli estremi limiti di tensione a cui sono oggi applicati i cavi, possiamo citare per i cavi trifasi quello relativo al cavo installato nella Galleria dei Giovi funzionante alla tensione di 23.000 volt, costruito dalla S. A. Ing. V. Tedeschi e C., e per i cavi unipolari il cavo di alimentazione della ferrovia elettrica Bitterfeld-Dessau, funzionante alla tensione di 30.000 volt, della Siemens-Schuckert.

È da ritenersi pertanto possibile entro certi determinati limiti l'impiego dei cavi per le lunghe linee di trasmissione della energia.

Ci proponiamo nella presente comunicazione di analizzare quali siano i limiti attuali di impiego dei cavi ad alta tensione, nella speranza che le nostre conclusioni abbiano ad informare come per parte dei costruttori sia continuo lo studio per perfezionarne la costruzione, e come torni loro ben gradito di poter discutere coi tecnici addetti all'esercizio ed alla costruzione degli impianti elettrici, un così importante problema.

I limiti i quali attualmente cingono il campo delle applicazioni dei cavi alle linee elettriche possono, a nostro avviso, essere compresi nelle seguenti classi:

1° Limiti imposti dalle necessità costruttive;

2° Limiti inerenti al costo delle canalizzazioni;

3° Limiti dipendenti dal funzionamento, in quanto si riferisce alla economia ed alla sicurezza dell'esercizio.

Riassumeremo le caratteristiche relative a cotesti limiti, svolgendo in modo particolare le considerazioni di ordine pratico, e riferendoci alla estensione dei cavi alle lunghe linee di trasmissione sotterranee.

Digitized by Google

PARTE PRIMA

Limiti costruttivi.

Le limitazioni costruttive che fissano il diametro massimo, secondo cui si può fabbricare un cavo, determinano in via generale, sia rispetto alla tensione come rispetto alla potenza, il campo di applicazione dei cavi.

Le dimensioni massime di un cavo subiscono inoltre limitazioni imposte dalle condizioni di posa, le quali non consentono, sia per il peso delle bobine raccoglienti il cavo, come per la rigidità del cavo stesso, di superare ben determinati diametri.

Fissati cotesti diametri massimi, può trattarsi in linea generale la questione dei limiti costruttivi, determinando in funzione delle dimensioni del cavo, quali sono le massime tensioni e le massime potenze a cui può servire.

È noto che avendosi un conduttore cilindrico di raggio r, circondato da uno strato di dielettrico uniforme, coperto esternamente da un'armatura concentrica conduttrice di raggio interno R, a potenziale V rispetto al conduttore interno, la relazione che determina le dimensioni del cavo in funzione del raggio del conduttore interno, della differenza di potenziale tra questo e l'involucro conduttore esterno e della rigidità dielettrica del materiale impiegato, è la seguente:

$$R = re^{\frac{d}{r}}.$$

In cotesta espressione d è lo spessore che dovrebbe avere il dielettrico quando la distribuzione del potenziale fosse attraverso ad esso uniforme; diremo cotesto spessore *spessore efficace.*

Se s esprime la massima sollecitazione a cui può essere sottoposto il dielettrico, con un opportuno coefficiente di sicurezza, lo spessore efficace risulta:

$$d = \frac{V}{s}$$

Digitized by Google

ed in funzione delle dimensioni del cavo:

$$d = r \log \frac{R}{r} .$$

Per ogni valore di V si ha un valore di r che rende minimo R, diametro esterno del cavo: tale valore della variabile r si ha facendo:

$$\frac{d\,R}{d\,r} = e^{\frac{d}{r}} \left(1 - \frac{d}{r}\right) = 0 .$$

Questa condizione è soddisfatta per $r = d = \frac{V}{s}$.

Il valore di r per cui R è minimo, e quindi, per ogni materiale proporzionale alla tensione a cui deve funzionare il cavo ed ha per ogni caso particolare di tensione e di natura del materiale isolante, un valore speciale.

Pel materiale isolante avente la rigidità dielettrica di 20.000 volt, quale può aversi attualmente e normalmente dai migliori costruttori sia per la carta impregnata che per la gomma, ed applicando un coefficiente di sicurezza 5 per cui $s = 4000$ volt, i valori di d, raggi del conduttore interno, e le corrispondenti sezioni relative al cavo di minimo raggio esterno, sono indicati nel diagramma a fig. 1 per cavi unipolari.

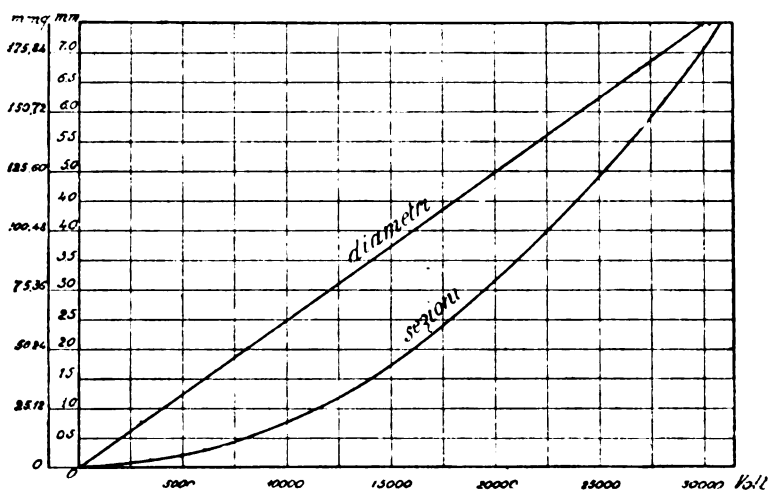


Fig. 1.

Le curve che rappresentano per ogni tensione il raggio del cavo sull'isolante in funzione del raggio del conduttore interno r,

Digitized by Google

hanno l'andamento della linea R del diagramma a figura 2, tracciata per V = 20.000 volt.

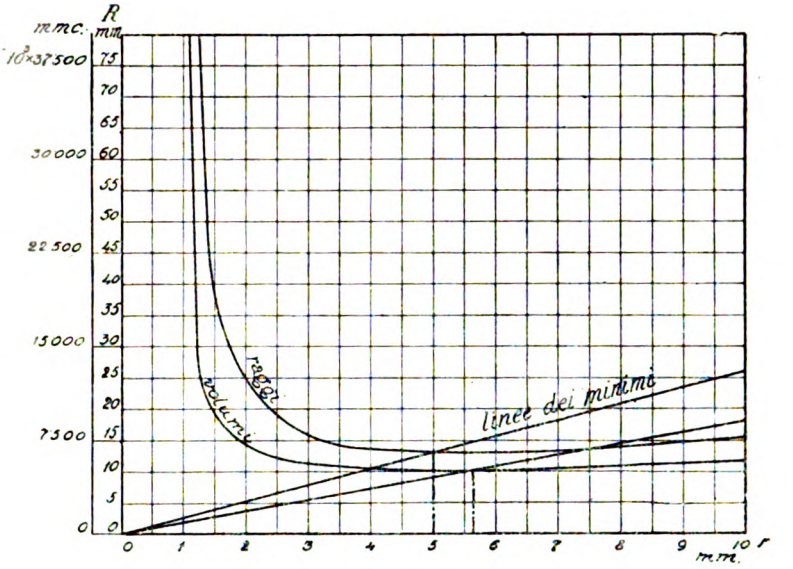


Fig. 2.

La curva è asintottica all'asse delle R e discende rapidamente fino al suo minimo per $r = d$ e sale poi oltre questa ascissa lentamente. I punti di minimo per tensioni diverse stanno su di una retta passante per l'origine, essendo caratterizzati dalla equazione $r = \frac{V}{s}$.

In linea generale è quindi conveniente per tutti i valori di r minori di d aumentare il raggio del conduttore interno fino a $r = d$; oltre questo valore il diametro del cavo viene di nuovo aumentando.

Il volume del materiale isolante non è però minimo per il minimo valore di R, in quanto che la corona circolare che ne rappresenta la sezione normale all'asse del conduttore è di area π ($R^2 - r^2$) che ha il suo minimo per $r = 1{,}254\ d$.

Nel diagramma a fig. 2 è pure rappresentata la curva relativa al volume del materiale isolante in funzione della variabile r, per V = 20.000 (1).

---

(1) La determinazione del gradiente del potenziale per i cavi trifasi è alquanto più complessa che non sia per i cavi unipolari, e dalla generalità degli autori

Digitized by Google

Per ogni cavo di determinate dimensioni esterne, si possono avere casi diversi di sezione e di tensione in funzione del raggio del conduttore e del risultante spessore del dielettrico.

Nella considerazione dei limiti costruttivi viene assunto come costante il valore di R e quindi in funzione del raggio r del conduttore, e delle caratteristiche del materiale isolante impie-

---

si propongono soluzioni approssimate che non possono però dare luogo ad una trattazione, da cui risultino le caratteristiche di massima utilizzazione del cavo.

Una soluzione approssimata consiste nel considerare la carica di ciascun conduttore concentrata sull'asse del conduttore ovvero al punto di immagine elettrica rispetto all'involucro esterno.

Cotesta soluzione conduce però a risultati lontani dall'esattezza, in particolare quando i conduttori sono di grande diametro.

Al problema si può però dare una soluzione generale ed esatta, considerando la ripartizione del potenziale nel dielettrico in modo separato per i diversi sistemi di conduttori inerenti al cavo trifase.

Le cariche elettriche sono da supporsi distribuite sulle superfici cilindriche ad assi paralleli costituite dai tre conduttori e dall'involucro metallico esterno, tra cui si hanno differenze di potenziale note.

Dato il sistema pratico di costruzione del cavo trifase in cui ogni conduttore è circondato da un determinato spessore di materiale isolante eguale per i tre conduttori, mentre l'insieme dei tre conduttori è circondato da uno spessore isolante eguale a quello che riveste i conduttori, quando il centro del sistema trifase è isolato e da uno spessore minore quando il centro è a terra, risulta molto semplificato il problema considerando i punti di massima sollecitazione.

I due sistemi da considerarsi sono quelli relativi alle due distribuzioni cilindriche a generatrici parallele, corrispondenti a due dei conduttori ed alle due distribuzioni, pure cilindriche ad assi paralleli competenti a un conduttore ed alla armatura esterna.

Limitandoci a considerare lo spazio compreso tra le due superfici, la cui distanza è appunto oggetto del calcolo, è noto che le superfici di livello od equipotenziali di cotesto sistema sono cilindri, tra la cui famiglia è pure compresa la superficie dei conduttori. Le superfici di livello comprese tra coteste due superfici sono di raggio successivamente crescente da r a ∞.

A cotesta distribuzione sulle superfici cilindriche possiamo sostituire due distribuzioni lineari rettilinee, lungo assi aventi per traccia sul piano normale all'asse dei conduttori i punti i quali dividono armonicamente, contemporaneamente, rispettivamente le distanze relative ai punti di incontro della linea di massima sollecitazione colle circonferenze traccia delle distribuzioni cilindriche sopra indicate.

Geometricamente è facile determinare tali punti, ed analiticamente risultano pure relazioni relativamente semplici.

Tenuto conto poi delle relazioni geometriche competenti al cavo trifase si può per ogni valore di r calcolare la tensione ammissibile nel cavo di maggiore diametro.

Digitized by Google

gato risulta il valore di V, rappresentante il valore massimo della tensione di esercizio per il cavo di diametro massimo.

Allo scopo di determinare in linea generale quali fossero i limiti che le sopra indicate condizioni impongono nell'uso dei cavi abbiamo calcolato e tracciato le curve di figg. 3, 4, 5, 6, relative a cavi trifasi ed a cavi unipolari.

La dimensione che si è assunta come massima corrisponde al diametro di 80 mm. sulla superficie esterna del materiale isolante; cotesto diametro conduce al diametro di circa 95 mm. sul cavo completamente finito e può considerarsi come il cavo di maggiori dimensioni da adottarsi, tenendo conto pure delle condizioni di posa.

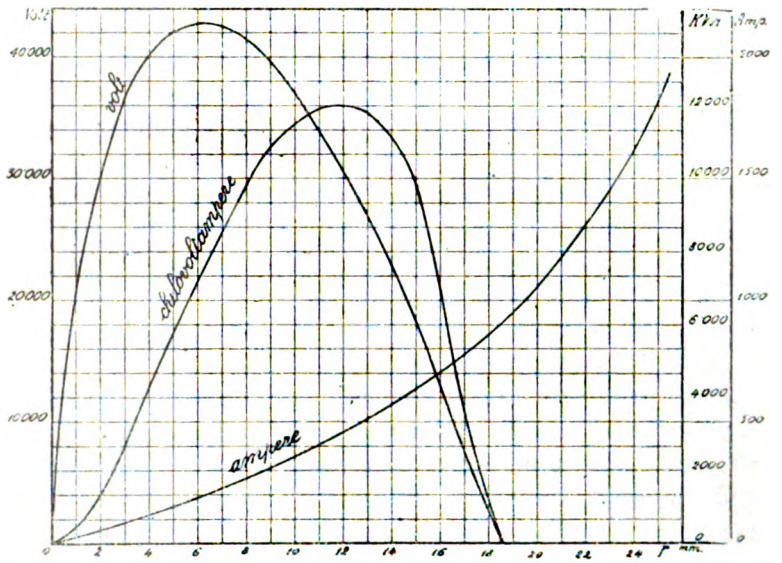


Fig. 3.

Limiti per cavi trifasi. — La fig. 3 si riferisce al cavo trifase a dielettrico omogeneo, in carta impregnata con coefficiente di sicurezza 5.

Le ascisse rappresentano i raggi del conduttori, i quali vengono in via di approssimazione supposti a sezione circolare, le ordinate indicano le tensioni per cui si può costruire, in corrispondenza del raggio del conduttore segnato sulla ascissa, il cavo, che per dimensioni sta nel limite costruttivo sopra indicato.

Digitized by Google

Il sistema trifase si è supposto senza punto neutro a terra ed il cavo è formato con eguale spessore isolante tra i conduttori, come tra i conduttori ed il piombo.

Tale curva parte dallo zero, e sale rapidamente in funzione della legge logaritmica che la regola, raggiunge un massimo, per tornare allo zero per il valore massimo di r compatibile in un cavo trifase, quello cioè per cui lo spessore dell'isolante è nullo. Il valore massimo di V è di circa volt 42.000 alternati efficaci per il raggio r di 6,5 mm., mentre il valore massimo di r è quello di 18,56 mm.

Può essere interessante di determinare la massima portata del cavo in ampere ed in kilovoltampere.

La massima portata in ampere risulta dalle note relazioni, le quali fissano per le sezioni ed i vari spessori isolanti le massime correnti ammissibili per un dato riscaldamento.

La potenza massima in kilovoltampere corrispondente ad ogni sezione è dipendente dalle curve V e A ed ammette un massimo di 12.000 KVA.

Tale massimo di potenza comprende certamente la potenza di centrali di media potenza, ma non può ritenersi sufficiente per impianti di maggiore potenza, nei quali casi saranno da collocarsi due o più cavi in parallelo.

Il massimo di potenza corrisponde al caso speciale di $r = 12$ mm. e di V = 30.500 volt circa.

Le curve prodotte possono servire per ogni caso speciale ad indicare per ogni valore della tensione e del raggio del conduttore quale sia la massima potenza corrispondente a ciascun cavo, onde determinare nei progetti il loro numero e la relativa spesa.

Per utilizzare meglio il materiale isolante ed onde ottenere di isolare il cavo con minore spessore di dielettrico e quindi realizzare nelle dimensioni limitate del cavo una maggiore tensione di esercizio, è opportuno di ricorrere per le alte tensioni alla formazione del cavo con dielettrico non omogeneo, ma graduato nella propria capacità specifica, per modo da realizzare un gradiente del potenziale meglio uniforme.

Non si può in questo caso stabilire, in linea generale, quali sono i potenziali ammissibili dal cavo per ogni valore di r, dipendendo essi dal modo di costruzione del cavo, che praticamente non può essere costrutto a ripartizione uniforme del potenziale; ma risulterà dalla ripartizione a legge logaritmica

Digitized by Google

corrispondente ad ognuno degli strati, in cui sarà suddiviso il dielettrico. Come caso asintotico che rappresenta l'estremo limite a cui può spingersi il cavo a dielettrico graduato, abbiamo stabilito le curve relative al caso di un cavo in cui si sia potuta realizzare una graduazione perfetta del dielettrico.

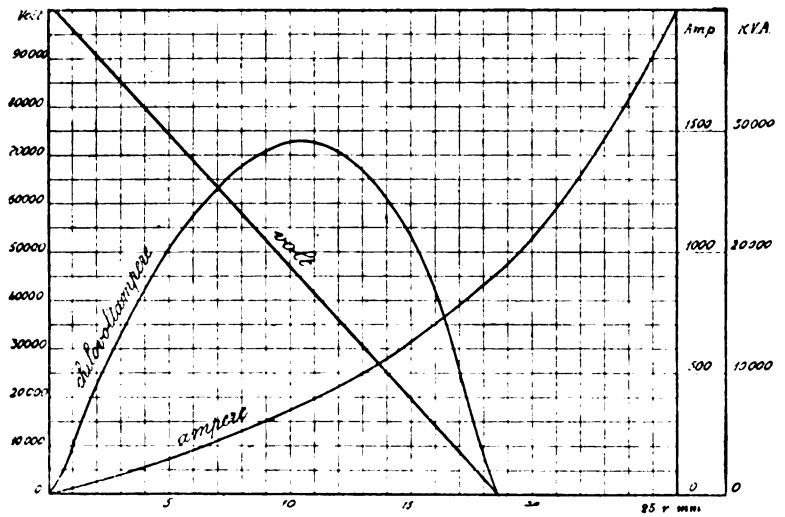


Fig. 4.

La figura 4 raccoglie per questo cavo gli stessi elementi relativi alla fig. 3.

La linea dei volt ha allora il suo massimo per $r = 0$ ed il suo valore nullo ancora per $r = 18{,}56$ mm. La tensione massima a cui potrebbe servire il cavo è di volt 100.000 circa, ed ha per i valori normali delle sezioni in cui viene utilizzato il cavo dei valori che praticamente comprendono tutti i casi pratici.

Il valore massimo della potenza corrispondente è di 29.000 kilovolt ampere per $r = 10{,}5$ mm. circa.

Cotesti valori hanno però solo importanza teorica in quanto che la graduazione ammessa non è praticamente realizzabile. Il cavo graduato avrà caratteristiche intermedie a quelle del cavo a dielettrico omogeneo, e quelle del cavo a distribuzione lineare del potenziale, facilmente determinabili dal costruttore volta per volta.

Limiti per cavi unipolari. — Il cavo unipolare, da adottarsi quando per valori troppo elevati del potenziale non sia possibile

Digitized by Google

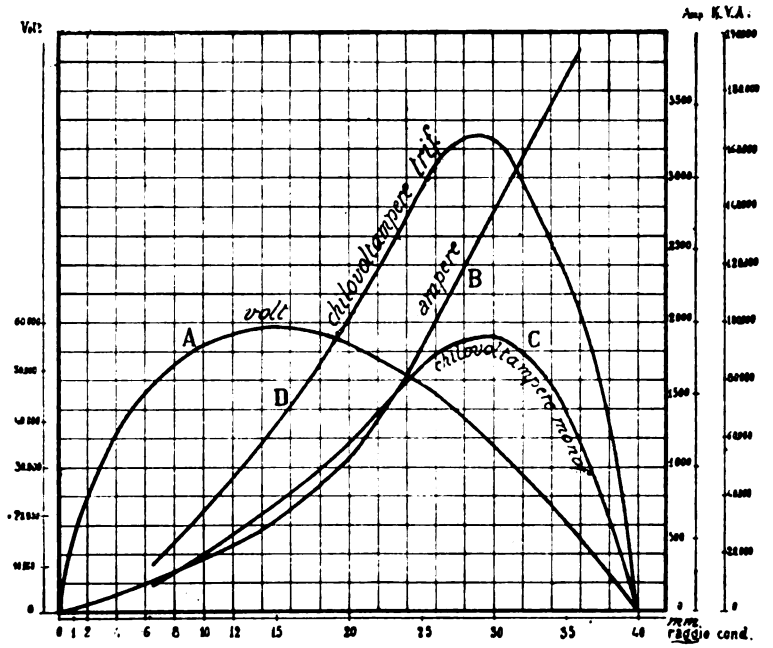


Fig. 5.

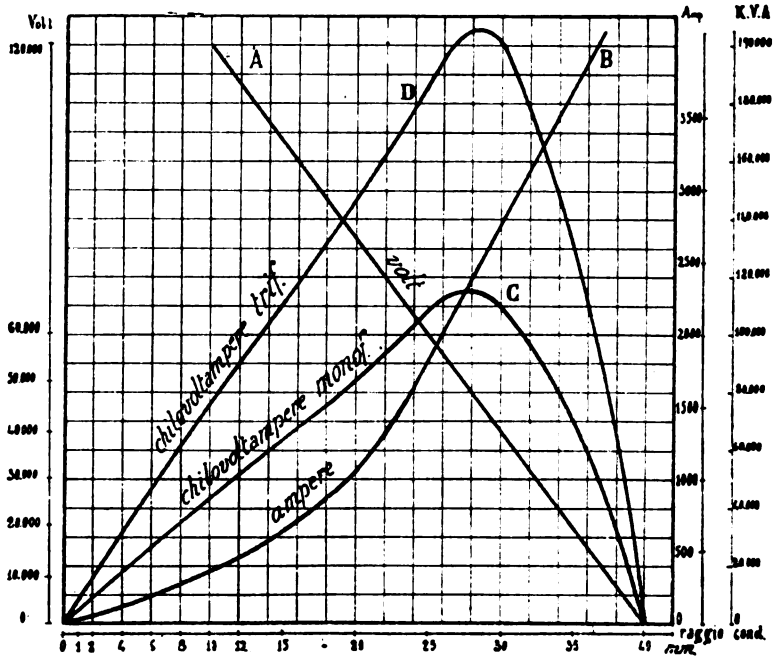


Fig. 6.

Digitized by Google

di costruire il cavo trifase è stato pure considerato, ed i risultati sono raccolti nelle figure 5 e 6.

Limitando la zona della curva in quel limite che corrisponde alle sezioni adottabili praticamente per le correnti alternate, il valore massimo della tensione di esercizio a cui può prestarsi il cavo unipolare a dielettrico omogeneo è di volt 58.000, corrispondente a 100.000 volt per trifase con centro a terra, e la potenza massima di KVA. 48.000 circa per distribuzione monofase, e di KVA. 80.000 circa per la trasmissione trifase.

Per le potenze eccedenti i limiti sopraindicati, per cui si ha possibilità di costruire il cavo per quanto riguarda la tensione, sarà possibile di provvedere egualmente alla sezione maggiore mediante più cavi in parallelo; quando invece la limitazione è imposta dalla tensione è necessario di ricorrere ai dispositivi di graduazione del dielettrico per cui presentiamo il diagramma di fig. 6.

Risulta da quanto precede che il cavo unipolare ha un campo di applicazione molto più esteso di quanto non competa al cavo trifase e come sia necessario di adottare questo tipo per le altissime tensioni.

Competono però al cavo unipolare speciali proprietà di comportamento di cui occorre tenere conto:

Per effetto del flusso magnetico alternato si hanno negli involucri metallici esterni, piombo e ferro, delle perdite percorrenti parassite e per isteresi di grande importanza.

Per quanto nei cavi ad alta tensione in cui le intensità di corrente sono relativamente piccole e gli involucri metallici si trovano in una regione di campo minore, per il rilevante spessore dell'isolante, pure con cavi armati e per frequenze dell'ordine di 50 periodi, le perdite assumono valori dell'ordine di quelli relativi alla perdita ohmica, con eccessivo riscaldamento del cavo e suo cattivo rendimento.

Con speciali armature formate di materiale non magnetico, ovvero così disposte da impedire la circolazione delle correnti parassite, e da interrompere la continuità elettrica e magnetica dell'armatura stessa, si possono ridurre, per frequenza di 50 periodi, tali perdite a valori dell'ordine del 25 $^0/_0$ della perdita nel rame. Poichè tali perdite stanno come i quadrati delle frequenze, si può praticamente usare il cavo unipolare così armato per più basse frequenze, dell'ordine di 15 periodi, come vengono frequentemente usate per la trazione elettrica.

Digitized by Google

Se però i cavi unipolari vengono adoperati senza armatura e posati coi noti sistemi di condotti in cemento, ovvero col Solyd System usato dagli inglesi, tali perdite si riducono grandemente e diventano di piccola importanza.

Tali perdite sono proporzionali al quadrato del prodotto $n \times I$ e dipendono dalla distanza reciproca dei cavi.

Risulta da esperienze che per una distanza degli assi dei conduttori di 100 mm. si hanno rispettivamente per le frequenze di 12, 25, 50 per un cavo di 150 mm. isolato con 10 mm. di carta perdite per correnti parassite nel piombo di 0,8, 3,2, 12 % della perdita ohmica.

Competono però al cavo unipolare alcuni speciali vantaggi:

La perdita del dielettrico è nel cavo unipolare circa la metà di quella corrispondente al cavo trifase.

Il cavo unipolare ha un minore riscaldamento, ed offre una maggiore sicurezza tra i conduttori avendo tra essi un maggiore spessore isolante.

Il cavo unipolare poi nei riguardi pratici permette una efficace riserva con minore costo di quanto non sia per il cavo trifase, in quanto che mentre una perforazione dell'isolante anche di un solo conduttore mette fuori servizio l'intero cavo, nel caso dell'unipolare la bruciatura di un cavo non compromette gli altri cavi e una certa riserva può essere costituita da un quarto cavo unipolare, mentre il ricambio della parte guasta di cavo si effettua con minore spesa. Tale cavo offre inoltre maggiore facilità di posa e di costruzione delle muffole di giunzione e terminali. Nel caso delle altissime tensioni, ed in numerosi casi particolari è pertanto da usarsi il cavo unipolare, provvedendo alle opportune disposizioni di costruzione.

Digitized by Google

PARTE SECONDA

Limiti economici.

La considerazione relativa al costo della installazione di lunghe linee in cavi può stabilire, insieme con altre considerazioni relative alla economia di esercizio, delle limitazioni alla loro applicazione, che è della massima importanza di riconoscere, stabilendo un confronto del costo delle linee aeree con quello delle linee in cavi.

Sul costo dei cavi ad alta tensione influiscono diversamente i due fattori della potenza: tensione e corrente, in quanto che mentre col crescere della tensione il costo del cavo viene crescendo per l'aumento dello spessore isolante, invece per l'aumento della sezione del conduttore, in conseguenza della nota legge della variazione del gradiente del potenziale, col variare del raggio di curvatura del conduttore, non risulta che il costo del cavo sia sempre crescente.

Si ha un costo minimo di ogni cavo per ogni determinata tensione, per una sezione intermedia tra quella relativa al diametro minimo del conduttore e quella relativa al volume minimo del materiale isolante. Ciò vale specialmente nella considerazione che il diametro del conduttore, corrispondente al volume minimo del materiale isolante, può realizzarsi senza aumentare il peso del conduttore, facendolo di forma tubolare coi noti dispositivi proposti allo scopo di avvicinarsi al diametro del conduttore di massima utilizzazione del cavo.

Portando queste considerazioni in ordine pratico abbiamo ritenuto interessante di raccogliere le risultanze relative ai costi di cavi di sezioni e tensioni diverse, analizzando i costi specifici relativi.

Cavi a dielettrico omogeneo. — La fig. n. 7 è per due casi speciali di cavi trifasi ad isolamento in carta impregnata, che possono in linea generale riferirsi a cotesta classe di cavi. Il dielettrico è supposto come omogeneo.

Le curve a a' riguardano la serie dei cavi a tensione co-

Digitized by Google

stante e sezione variabile. La tensione scelta è di 30.000 volt e la sezione varia da 0 a 70 mmq.

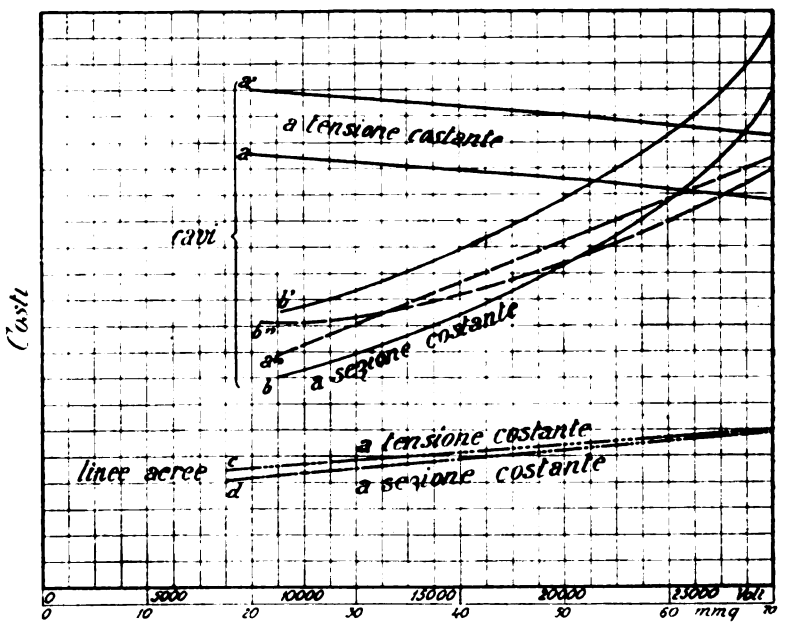


Fig. 7.

Entro tali limiti il costo del cavo è decrescente col crescere della sezione, da cui risulta la importante conclusione che in coteste linee in cavi puossi aumentare notevolmente la sezione, pure diminuendo il costo del cavo. Per la tensione di 30.000 volt il diametro più conveniente risulta per una sezione di circa 176 mmq.

Le curve *b b'* indicano come varia il costo di un cavo trifase a sezione costante col variare della tensione. La sezione relativa al caso considerato è di 70 mmq.

La curva *b* si riferisce al costo del cavo in officina, mentre la curva *b'* si riferisce al costo del cavo posato alla profondità di m. 0,60 in terreno ordinario, protetto con cassetta di legno incatramato ed immerso in braygras con protezione di mattoni.

Ha particolare interesse la considerazione dei costi specifici:

Il costo specifico per voltmmq. relativo alla serie a tensione costante decresce col crescere della sezione in modo molto rapido e rende evidente come, specialmente per le grandi sezioni

Digitized by Google

e grandi intensità di corrente, sia conveniente l'uso dei cavi (Vedi fig. 8).

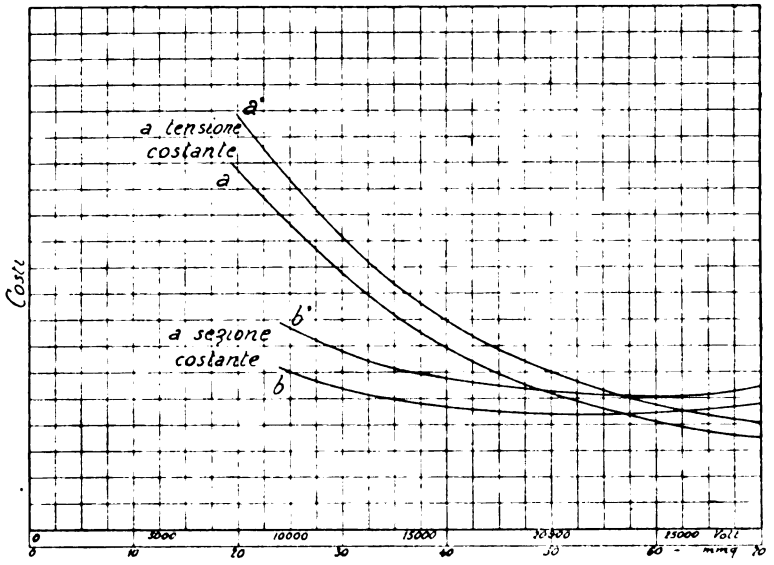


Fig. 8.

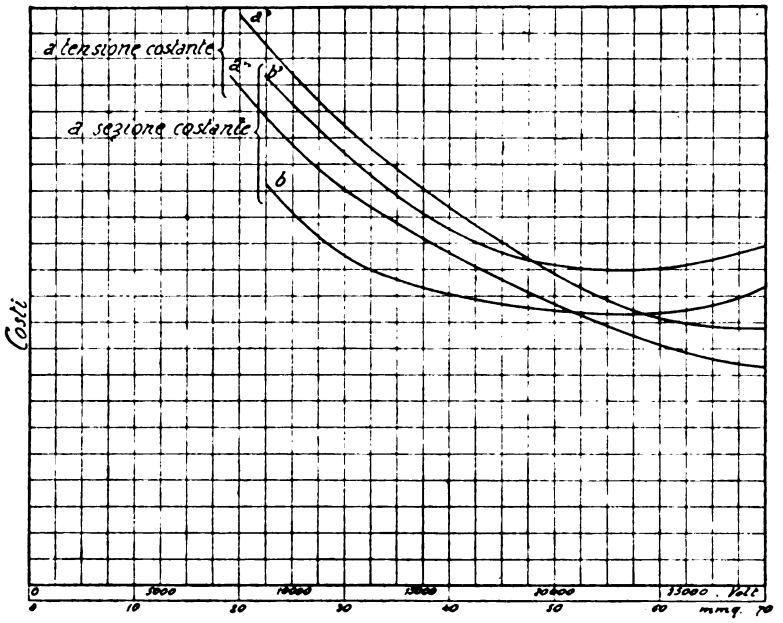


Fig. 9.

Digitized by Google

Il costo per voltmmq., assumendo come variabile la sezione, è decrescente per sezioni fino a 50 mmq., risale poi col crescere della tensione.

Il minimo di tale costo è in vicinanza della sezione per cui il raggio del conduttore è quello di minimo diametro esterno del cavo.

Le curve della fig. 9 riportano i dati di costo riferiti al KVA. per il massimo carico ammissibile nel cavo, e tengono conto delle intensità massime di corrente tollerabili nel cavo stesso.

Si riferiscono sia al costo del cavo in officina che a quello del cavo posato.

Abbiamo esteso gli stessi calcoli eseguiti sulle serie dei cavi trifasi ai cavi unipolari onde stabilire un confronto fra i due tipi di cavi.

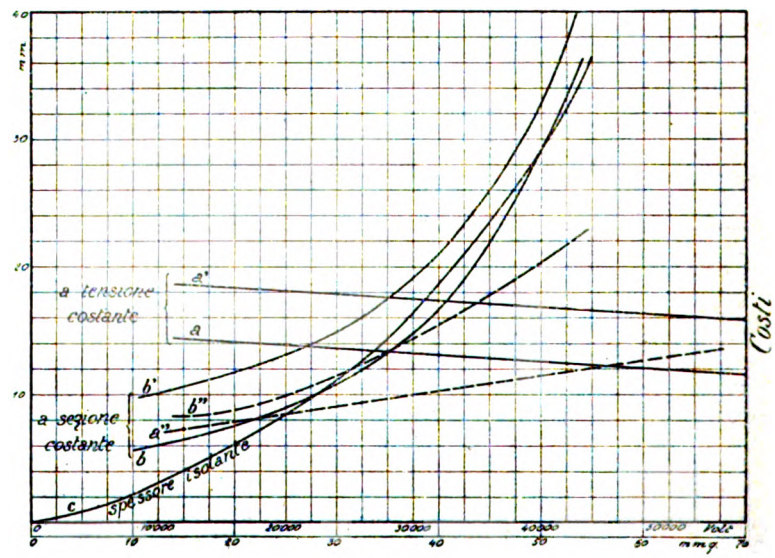


Fig. 10.

Nella fig. 10 le curve *a a'* rappresentano i costi di tre cavi unipolari, in officina e posati, alla tensione di 30.000 volt verso il piombo ed a sezione crescente. Le curve *b b'* si riferiscono al cavo di sezione costante di 70 mmq., e per tensione crescente verso il piombo fino a 42.000 volt.

Nella fig. 11 abbiamo i diagrammi del costo per voltmmq. di cui le curve *a a'* sono a tensione costante e sezione variabile

Digitized by Google

e le curve b b' si riferiscono al caso di sezione costante 70 mmq. e tensione crescente.

Appaiono evidenti in cotesti diagrammi i punti di minimo, per cui si ha il minore costo specifico dei cavi.

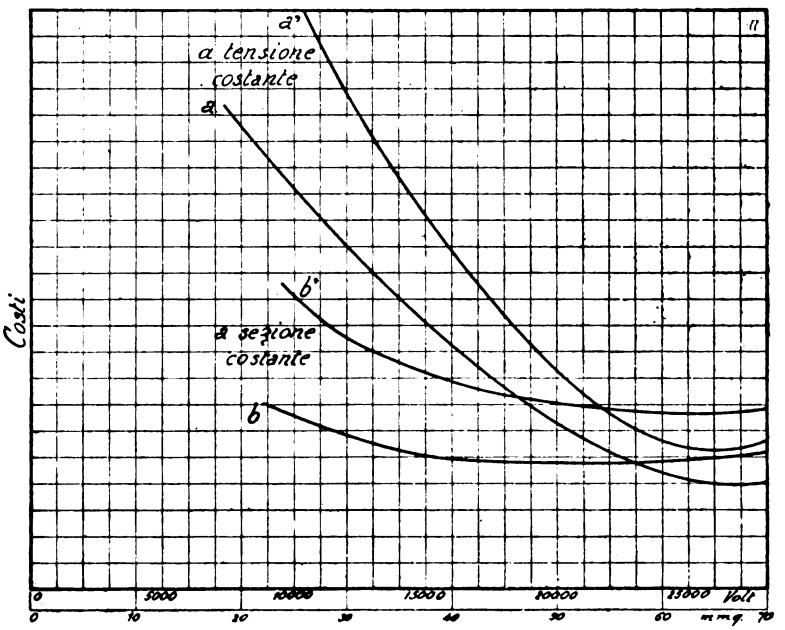


Fig. 11.

Le curve della fig. 12 sono relative al costo per KVA. per una trasmissione trifase, effettuata con cavi unipolari.

Il paragone tra il costo della trasmissione mediante cavi trifasi e quello del costo mediante tre cavi unipolari può farsi colle risultanze dei diagrammi riportati, avendo considerazione che la tensione di esercizio relativa ai cavi unipolari è $\sqrt{3}$ di quella corrispondente alla tensione dei diagrammi stessi, quando non si voglia per maggiore sicurezza dare al dielettrico lo stesso spessore compreso tra i conduttori del sistema trifase.

Mentre nel caso in cui si sia disposto per uno spessore di materiale isolante sui cavi unipolari eguale a quello compreso tra i metalli del cavo trifase il costo di tre cavi unipolari è di poco maggiore di quello del cavo trifase, quando si consideri che nell'uso di distribuzioni trifasi con neutro a terra il poten-

Digitized by Google

ziale effettivo tra i conduttori ed il piombo nei cavi unipolari è solo $\frac{V}{\sqrt{3}}$, risulta una certa economia nell'uso dei cavi unipolari.

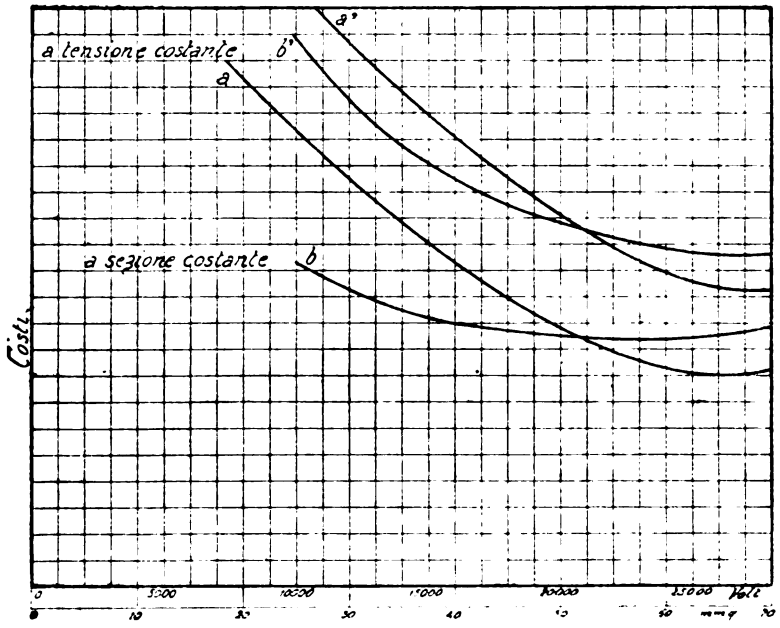


Fig. 12.

Cavi a dielettrico graduato. — Sulle stesse figure relative ai costi dei cavi trifasi ed unipolari, abbiamo riportato le curve rappresentanti detti costi per dielettrico convenientemente graduato, formandolo con il sistema della Ditta Tedeschi, con gomme non vulcanizzate di alta rigidità dielettrica, a costante dielettrica variabile e con carta impregnata.

Nelle figg. 7 e 10 le linee *a''* sono relative alla serie dei cavi a tensione costante, e quelle *b''* alla serie dei cavi a sezione costante.

Sia per i cavi unipolari che per i cavi trifasi risulta evidente come per le tensioni minori (fino a circa 25.000 volt) sia più economico il tipo a dielettrico omogeneo, mentre per le alte tensioni sia più economico quello a dielettrico graduato.

Risulta pure dalle curve a tensione costante e sezione variabile che per le sezioni minori (fino a 60 mmq. per la linea

Digitized by Google

a 30.000 volt) costi meno il cavo graduato, mentre per le sezioni maggiori, in cui il massimo gradiente del potenziale diminuisce, è più economico il cavo a dielettrico omogeneo in carta impregnata.

Paragone colle linee aeree. — In merito al paragone del costo delle linee aeree con quello delle linee in cavi, ci riferiamo alla trattazione esposta in merito al precedente Congresso delle Applicazioni elettriche, tenuto a Marsiglia nel 1909, dal signor Marchena nella sua memoria " Canalisations souterraines „.

Cotesto autore, dopo avere posto sotto forma generale approssimata, in funzione di parametri sperimentali, i costi di cavi trifasi e di linee aeree per tensioni diverse, giunge alla conclusione che per le basse tensioni la differenza tra il costo delle linee aeree e quello delle linee sotterranee è poco sensibile, essendo però sempre quest'ultimo superiore.

Col salire della tensione la differenza diventa sensibile e per eguale conducibilità le linee aeree non costano più della metà o dei due terzi delle canalizzazioni sotterranee.

Per rendere più evidenti cotesti rapporti di prezzi, abbiamo tracciato sul diagramma di fig. 7 relativo al costo dei cavi trifasi le linee rappresentanti i costi delle linee aeree per le stesse condizioni di tensione e di sezione. I costi delle linee aeree sono stati dedotti dalle formole generali approssimate indicate da Marchena. Cotesti rapporti fra il costo delle linee in cavi e quelle in linee aeree non sono però da considerarsi per gli stessi valori di raggio del conduttore, in quanto è possibile per i cavi di ridurre grandemente il costo del cavo, realizzando il raggio del conduttore più conveniente, ed al costo della linea aerea, è da paragonare precisamente il cavo corrispondente di minore costo.

Se consideriamo poi che per tensione costante e sezione crescente la linea del costo dei cavi è decrescente fino al suo minimo, mentre la curva del costo delle linee aeree è continuamente crescente, ne viene la conclusione che per le grandi sezioni la differenza relativa di prezzo è minore. Inoltre crescendo la sezione, si rende necessario, per il caso delle linee aeree, di usare più fili in parallelo, con aumento del costo dei piloni, mentre per il cavo non si ha sensibile maggiore costo di posa e si realizza anzi nel caso delle alte tensioni una diminuzione del costo del cavo per il minore spessore del dielettrico risultante per una maggiore sezione.

Digitized by Google

È però da considerarsi che per linee aeree le terne di riserva si possono installare sulle stesse palificazioni con un costo grandemente minore di quanto corrisponde alla installazione di un secondo cavo di riserva.

Il costo della riserva per le linee in cavo può, coll'uso del sistema a cavi unipolari, ridursi alquanto, provvedendo alla riserva parziale di uno o due conduttori.

Cotesti casi speciali sfuggono ad una trattazione di indole generale e può essere più utile di fissare le idee su di una particolare linea sulla quale si hanno dati concreti.

Riportiamo in nota lo studio della linea ad alta tensione che allaccia la centrale elettrica dell'impianto elettrico municipale colla stazione di ricevimento in Torino (1).

---

(1) *Confronto del costo della linea aerea di Chiomonte dell'impianto elettrico municipale di Torino con una linea in cavi.*

Le caratteristiche principali della linea aerea che collega la centrale idroelettrica di Chiomonte colla stazione di trasformazione collocata in Torino, sono le seguenti:

Numero e sezione dei conduttori: n° 6 conduttori di rame nudo elettrolitico semicrudo del diametro di $^{75}/_{10}$ di mm.;

Lunghezza dello sviluppo della linea: mt. 56.146;

Tensione di esercizio: 50.000 Volt concatenati;

Costo complessivo della linea, comprese le espropriazioni ed opere accessorie . . . . . L. 1.090.000,—

Costo medio per Kmt . . . . . » 19.412,—

Massimo carico per terna: 4220 Kw.

Costo per mmq. di sezione trifase . . . . . » 220,59

Volendo eseguire detta linea in cavo colla stessa sezione di conduttori, occorrerebbe di ricorrere ad un sistema di cavi unipolari non armati, posati con protezioni di tubi di *grès*.

Il costo dei tre cavi unipolari per un conduttore della stessa sezione di quella linea aerea e calcolati per una tensione tra piombo e rame eguale a $\frac{50000}{\sqrt{3}}$ sarebbe di L. 23.000 per Kmt. compresa la posa e per due terne sarebbe di L. 46.000.

La stessa linea per tre cavi unipolari calcolati per una tensione verso il piombo di 50.000 Volt per prevedere il caso di una fase a terra, costerebbe L. 28.480 per kmt. per terna, e per due terne L. 56.960.

Coteste cifre direbbero assolutamente non conveniente l'uso di cavi per tale trasmissione; devesi però considerare che la sezione adottata per la linea aerea, regolata da altre leggi che non sia la trasmissione in cavi, non è quella più conveniente per la trasmissione in cavi.

Conviene anzitutto di considerare se l'uso della sezione di diametro esterno minimo non conduca ad un sensibile minor costo.

Digitized by Google

Impiego dell'alluminio. — Il costo dei cavi ad alta tensione può essere diminuito coll'uso dell'alluminio come conduttore, sia in conseguenza del minore costo a parità di conducibilità del conduttore, sia per l'aumento di diametro che compete a parità di conducibilità, al conduttore di alluminio, e che diminuisce il gradiente del potenziale nel dielettrico.

Riferendoci alla trattazione esposta nella prima parte in cui viene determinato il raggio del conduttore r corrispondente per ogni data tensione al minimo spessore dell'isolante, risulta evidente intanto, che per tutti quei valori del raggio del conduttore di rame interno che sono inferiori a $\frac{d}{1{,}28}$ (il raggio del conduttore di alluminio avente la stessa conducibilità del conduttore

---

Per la tensione di 50.000 Volt e per isolante costituito di carta impregnata aventi le caratteristiche ed il coefficiente di sicurezza sopra indicato, il raggio per cui compete il raggio minimo esterno del cavo è di 4,70 e di 7,81 mm. rispettivamente nel caso di tensione rispetto al piombo di $\frac{V}{\sqrt{3}}$ o di V.

Usando il sistema di formazione anulare del conduttore, per cui si ottiene il raggio più conveniente mantenendo la stessa sezione, si hanno i seguenti costi:

Nel primo caso il costo per kmt. di una terna di cavo posato sarebbe di L. 21.000, ed il costo di due terne posate di L. 42.000; nel secondo caso il costo di ciascuna terna sarebbe di L. 22.890 e di due terne L. 45.780;

I costi per mmq. di sezione sono rispettivamente di L. 477,27 e di L. 520,22.

Devesi però ancora notare a conferma che le trasmissioni in cavi sono specialmente convenienti per grandi potenze, che il raggio più conveniente scelto, il quale è maggiore di quello considerato, corrisponde ad una sezione notevolmente maggiore di quella della linea in considerazione, quindi nel caso in cui venisse utilizzata muterebbe i rapporti di prezzo.

Infatti tale sezione è nel primo caso di 69 mmq. e nel secondo di 191 mmq., astraendo in coteste considerazioni generali dalla riduzione di sezione corrispondente alla formazione a corda del conduttore.

Quando la sezione corrispondente al raggio considerato venisse completamente utilizzata, il prezzo dei cavi aumenterebbe soltanto del valore del rame corrispondente alla maggiore sezione e particolarmente:

il cavo di 69 mmq. costerebbe per una terna L. 22.200 e per due terne posate L. 44.400 per Kmt.;

il cavo di 191 mmq. per terna costerebbe L. 30.970 e per due terne L. 61.840.

I costi per mmq. di sezione sono rispettivamente L. 321,74 e L. 161,88.

Il costo per mmq. viene costantemente diminuendo indicando che i cavi sono specialmente convenienti per le grandi potenze.

Nel caso speciale, quando fosse considerata come riserva sufficiente l'uso di un quarto cavo unipolare, il rapporto fra il costo della linea aerea e quella in cavo sarebbe di 0,78 per la stessa sezione del conduttore.

Digitized by Google

di rame è 1,28 volte di questo) è conveniente la sostituzione del conduttore di alluminio a quello di rame di uguale conducibilità. In questo caso, colla sostituzione del conduttore di alluminio, si realizzano economie per tutte e tre le classi dei materiali costituenti ogni cavo: il conduttore è di costo minore: il volume dell'isolante è minore in quanto che si riduce sia per l'aumento di raggio del conduttore interno, come per la diminuzione di raggio del conduttore esterno; gli involucri di protezione esterna, tubo di piombo ed armatura diminuiscono di peso in conseguenza del raggio esterno minore.

Il considerare $r < \frac{d}{1,28}$ limita però la dimostrazione a casi particolari specialmente alle alte tensioni, perchè quanto è più alta la tensione, tanto maggiore è il raggio più conveniente. Se $r > \frac{d}{1,28}$, la sostituzione dell'alluminio al rame, per formare il conduttore, conduce a valori del raggio del conduttore superiori a d e quindi a valori sempre crescenti di R, che possono fissare il limite di r per cui cessa la convenienza della sostituzione dell'alluminio al rame.

È facile però di riconoscere in funzione degli elementi di costo del cavo quale sia questo limite di r nelle condizioni che corrispondono al funzionamento dei cavi.

In un nostro precedente studio, comparso sul giornale " L'Elettricista „, n. 10 e 13 del 1909, abbiamo considerato entro quali limiti fosse conveniente la sostituzione del rame all'alluminio per la formazione dei conduttori dei cavi ad alta tensione, avendo riguardo alla spesa dei materiali formanti il cavo.

Abbiamo ivi dimostrato che per un rapporto tra il prezzo per unità di peso dell'alluminio e quello del rame di 1,25, i raggi corrispondenti al conduttore di rame per cui si ha convenienza nell'uso dell'alluminio sono rappresentati dalla seguente espressione:

$$+ r \geq \frac{2,58\, e^{1,28\frac{x}{}} - 2,02\, e^{x}}{0,295\, e^{2x} - 0,48\, e^{1,56x} + 1,28}$$

in cui

$$x = \frac{d}{r}.$$

Digitized by Google

Quando si tracci la curva:

$$r = \frac{2{,}58\, e^{\frac{x}{1{,}28}} - 2{,}02\, e^{x}}{0{,}295\, e^{2x} - 0{,}48\, e^{1{,}56x} + 1{,}23}$$

avente per ascisse i valori di x e per ordinate i valori di r e luogo dei punti per cui il costo del cavo in rame è uguale a quello del cavo in alluminio, il piano della figura risulta diviso in due zone: l'una inferiore, e l'altra superiore, luoghi dei punti per cui si ha rispettivamente minore o maggiore costo del cavo in rame rispetto a quello in alluminio (fig. 13).

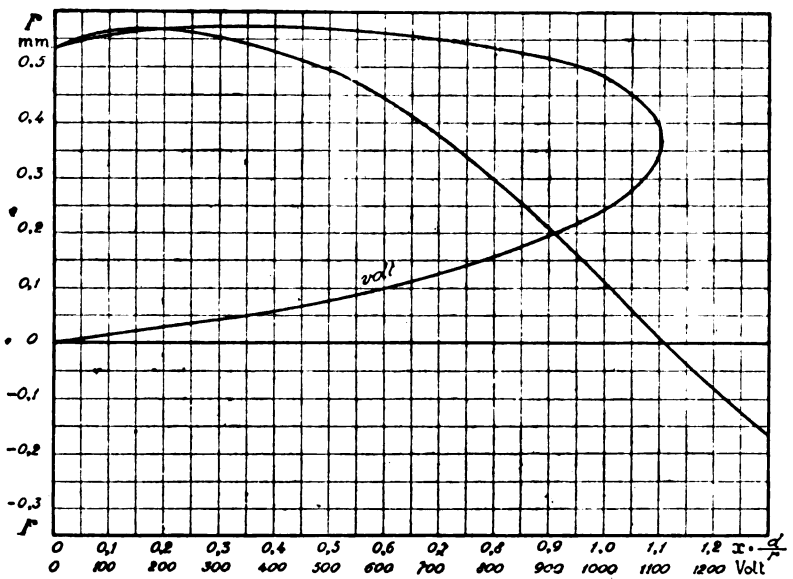


Fig. 13.

I punti della curva r vengono calcolati attribuendo ad x successivi valori; ora, se limitiamo ad x i valori positivi, che soli hanno significato nel problema fisico speciale, la variabile può oscillare fra 0 e ∞, a seconda dei valori attribuiti alle variabili indipendenti: d proporzionale alla tensione di funzionamento del cavo, ed r proporzionale alla sezione del conduttore.

In ogni caso particolare può riconoscersi se il punto corrispondente al cavo da costruire cada nella zona alluminio o nella zona rame.

Digitized by Google

Si consideri però che $x = \frac{d}{r}$ e che per tutti i valori di r minori di $\frac{d}{1{,}28}$ noi abbiamo dimostrato essere di minore costo il cavo di alluminio che non quello di rame; siamo condotti quindi, per completare la dimostrazione, a fare variare x tra i limiti 0 e 1,28 corrispondenti a tutti i valori di r maggiori od uguali a: $\frac{d}{1{,}28}$.

Nell'intervallo considerato, r si annulla per

$$2{,}58\, e\, \frac{x}{1{,}28} - 2{,}02\, e^{x} = 0$$

che corrisponde $x = 1{,}11532$.

Per valori di x compresi fra 0 e 1,11532, r si mantiene positivo e varia tra un massimo di 0,565 e zero; per valori di x maggiori di 1,11532, r diventa negativo ed assume per $x = 1{,}28$ il valore $-0{,}167$.

La tabella seguente raccoglie i valori di r e di d calcolati in funzione di x e rappresentanti i casi particolari di ugual costo del cavo in rame e di quello in alluminio.

Digitized by Google

x	r mm.	d	V Volt
0.00	0.535	0	0
0.10	0.565	0.0565	332
0.20	0.538	0.1076	430
0.30	0.535	0.1605	642
0.40	0.518	0.2072	828
0.50	0.489	0.2445	978
0.60	0.454	0.2724	1089
0.70	0.400	0.2800	1120
0.80	0.294	0.2352	940
0.90	0.207	0.1863	745
1.00	0.115	0.115	460
1.10	0.024	0.0264	104
1.11	0.019	0.0132	52
1.115	0.00406	0.0045	18
1.11532	0	0	0
1.12	— 0.00806	— 0.00 897	— 35
1.20	— 0.093	— 0.1116	— 446
1.28	— 0.167	— 0.2137	— 854
1.30	— 0.206	— 0.2678	— 1071
1.40	— 0.295	— 0.4130	— 1652
1.50	— 0.341	— 0.5115	— 2046
1.60	— 0.381	— 0.6096	— 2438
1.70	— 0.397	— 0.6749	— 2699
1.80	— 0.403	— 0.7254	— 2901
1.90	— 0.422	— 0.8018	— 3207
2.00	— 0.409	— 0.818	— 3272

Sono anche calcolati i valori di V corrispondenti a cavi in carta impregnata per una sollecitazione massima del dielettrico di 4000 Volt per mm. Per ognuno dei V indicati nella tabella corrisponde ad ogni r maggiore di quello indicato un minor costo del cavo in alluminio.

Il diagramma a fig. 13 rappresenta la curva r nell'intervallo considerato. Per ogni valore di r maggiore dei valori relativi a questa curva, il cui massimo è 0,565 mm. e per le tensioni indicate per il materiale isolante preso in considerazione, si ha il minor costo del cavo in alluminio.

Questo raggio del conduttore è generalmente superato nella costruzione dei cavi, per cui può concludersi che nella maggior

Digitized by Google

parte dei casi pratici, il costo del cavo in alluminio è minore del costo del cavo in rame, quando nella costruzione del cavo si applichino le dimensioni dedotte in linea teorica nella presente trattazione.

Per ogni condizione di prezzo dei due metalli, tale valore limite del raggio per cui si ha ugual costo dei cavi, varia e va precisamente crescendo col crescere del rapporto tra il prezzo dell'alluminio e il prezzo del rame. Per un prezzo dell'alluminio uguale al doppio del prezzo del rame il valore massimo di r è circa 1,9.

Se però si tien conto che per le basse e le medie tensioni lo spessore del materiale è fissato mediante considerazioni di ordine pratico, attinenti alla lavorazione ed alla posa dei cavi, dobbiamo limitare le nostre deduzioni ai cavi ad alta tensione, in cui le calcolazioni basate su elementi teorici hanno la massima importanza ed una buona conferma sperimentale.

Per le medie tensioni, che riteniamo debbano stabilirsi fra 1000 e 10000 Volt, sarà invece da calcolarsi in ogni caso particolare il risparmio proveniente dalla detta sostituzione.

***

La considerazione economica della convenienza dell'uso dei cavi non può limitarsi al puro costo di primo impianto della linea, ma deve estendersi alle spese di esercizio, relative alla sorveglianza, mantenimento, ed ammortamento, notevolmente minori per i cavi, che non per le linee aeree, per modo che l'economia può spesso rappresentare l'interesse di un capitale atto a coprire la differenza di costo fra i due impianti.

In molti casi speciali riescirà più economico l'uso dei cavi quando si possa con essi abbreviare il tracciato o ridurre le spese di attraversamenti di corsi d'acqua, di vie ferrate, di abitati, ecc., ovvero le spese di espropriazione o di servitù di passaggio.

Digitized by Google

PARTE TERZA

Limiti di funzionamento.

Nel paragonare le lunghe linee di trasmissioni in cavi alle linee aeree è interessante di stabilire quali siano le rispettive condizioni di funzionamento, in merito al rendimento della trasmissione dell'energia.

L'uso dei cavi per trasmettere l'energia a grande distanza rende necessario di considerare elementi, parte trascurabili e parte non esistenti per le linee aeree, che hanno invece la massima influenza sul rendimento della trasmissione in cavi.

Le perdite principali che hanno a considerarsi in una trasmissione di energia per cavi sono di tre ordini diversi:

a) Perdita ohmica, corrispondente all'effetto Joule, relativa alla intensità di corrente risultante nel conduttore, e alla resistenza effettiva del conduttore;

b) Perdita per l'isteresi nel dielettrico;

c) Perdita per correnti parassite e per isteresi negli involucri metallici che circondano il cavo.

Nel calcolo del rendimento industriale di una trasmissione in cavi, è da trascurarsi la perdita dovuta alla ammittanza, dipendente dalle condizioni di isolamento del cavo, in quanto che in una installazione normale la intensità di corrente derivata in conseguenza è di minimo valore.

Il complesso delle perdite risulta pertanto espresso nel funzionamento a carico da

$$W = \int_0^R i^2 \, d\,R + W_{is} + W_{met},$$

essendo i la intensità di corrente corrispondente ad ogni elemento di conduttore, e $d\,R$ la resistenza relativa, da calcolarsi secondo gli elementi della linea stessa. La corrente i che percorre la linea è diversa da punto a punto, in quanto che risulta da un termine costante relativo al valore della corrente erogata alla

Digitized by Google

estremità del cavo e da un termine variabile relativo alla corrente di capacità.

Nel funzionamento a vuoto il cavo dà pure luogo a perdite che hanno maggiore importanza di quelle relative alla linea aerea, che possono ivi talora considerarsi come trascurabili.

Detta i_c la corrente di capacità inerente ad ogni elemento di lunghezza di conduttore, linearmente decrescente dall'origine all'estremo, il complesso delle perdite a cui è soggetto il cavo quando è sotto tensione e non fornisce corrente è il seguente:

$$W = \int_0^R i_c^2 \, d\,R + W_{is},$$

ritenendo trascurabili in cotesto caso le perdite nei metalli dipendenti dal flusso magnetico in conseguenza della corrente di capacità.

Rispetto alle perdite a vuoto è da notarsi che il funzionamento in questa condizione può considerarsi in due casi diversi: quello in cui alla estremità del cavo non sono uniti apparecchi di sorta e quello più frequente in cui a tale estremità sono connessi i primari dei trasformatori a circuito secondario aperto.

Le condizioni di comportamento del cavo sono nei due casi assolutamente diverse, e le relative caratteristiche per il secondo caso, in cui le auto-induzioni competenti ai trasformatori modificano il valore della corrente di linea, sono da valutarsi in ogni speciale impianto.

Rimandando per le perdite relative all'isteresi nel dielettrico e per quelle negli involucri metallici alle numerose notizie che si hanno al riguardo (1), ci occupiamo in modo speciale dell'effetto della capacità corrispondente ai cavi riassumendo le considerazioni, che in linea assolutamente generale permettono di valutare nella applicazione ai casi particolari le relazioni di rendimento tra una lunga linea di trasmissione mediante cavo e mediante linea aerea.

Effetto della corrente di capacità. — La intensità di corrente che si stabilisce nel cavo in corrispondenza di una determinata potenza da erogare alla sua estremità è funzione della capacità del cavo stesso, e del fattore di potenza inerente all'impianto da alimentarsi.

---

(1) Vedi Bibliografia in calce.

Digitized by Google

La capacità per le lunghe linee di trasmissione in cavi ha una speciale importanza, sia per il rendimento della trasmissione, sia per quello dell'impianto generatore, e la sua azione deve essere considerata particolarmente.

Riferendoci a lunghe linee di trasmissione ad alta tensione in cavi, lo schema più generale di installazione è quello rappresentato dalla figura 14, in cui un generatore di corrente alternata D connesso con un trasformatore sopra elevatore T_1 alimenta la linea in cavo, la quale al suo estremo è connessa al primario del trasformatore T_2 che col suo secondario dà corrente al circuito utilizzatore a bassa tensione. Può mancare taluno dei trasformatori, ma è importante di considerare il caso generale sopra stabilito.

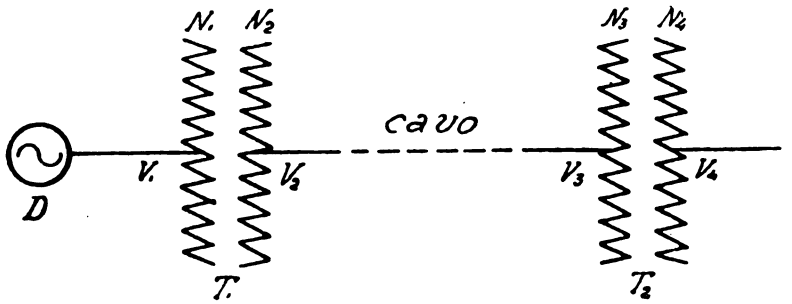


Fig. 14.

Indichiamo con $i_1 N_1 L_1 — i_2 N_2 L_2$ i valori delle intensità di corrente, del numero delle spire e del coefficiente di selfinduzione rispettivamente dell'avvolgimento primario e secondario del trasformatore T_1; con $i_3 N_3 L_3 — i_4 N_4 L_4$ i valori corrispondenti del trasformatore T_2; con $M_{1.2}$ e $M_{3.4}$ i coefficienti di mutua induzione tra gli avvolgimenti primari e secondari dei due trasformatori.

Conviene di considerare separatamente i casi in cui la linea in cavo ha i suoi estremi isolati, ovvero connessi al trasformatore T_2 con carico.

I. — *Linea con estremi isolati.*

In questo caso, facendo astrazione dalle derivazioni provenienti dalla conduttanza del cavo, la corrente che lo percorre è la sola corrente di capacità.

Le equazioni fondamentali del circuito primario e del circuito

Digitized by Google

secondario quando al circuito primario è applicata la tensione primaria $v = \mathrm{V} \operatorname{sen} 2\pi n t$ sono:

$$r_1 i_1 + \mathrm{L}_1 \frac{d}{dt}(i_1)_{t-t'} + \mathrm{M}_{1,2} \frac{d}{dt}(i_2)_{t-t'} = \mathrm{V} \operatorname{sen} 2\pi n t$$

$$r_2 i_2 + \mathrm{L}_2 \frac{d}{dt}(i_2)_{t-t'} + \mathrm{M}_{1,2} \frac{d}{dt}(i_1)_{t-t'} = -(v)_{x=0}$$

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{R}}{l} i + \frac{\mathrm{L}}{l} \frac{\partial i}{\partial t} &= -\frac{\partial v}{\partial x} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= \frac{\mathrm{C}}{l} \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned}\right\} \text{ tra i limiti } \begin{matrix} x = 0 & i = i_2 \\ x = l & i = 0 \end{matrix}$$

in cui R, L, C rappresentano la resistenza, il coefficiente di self e la capacità di un conduttore della linea e dove t' indica il ritardo di magnetizzazione nel ferro del trasformatore e $i_{(t-t')}$ i valori istantanei della corrente nell'intervallo di tempo $t - t'$.

Sviluppando e combinando coteste funzioni, tenendo conto del valore relativo delle grandezze che entrano nelle espressioni circolari ed esponenziali, per il loro sviluppo in serie, si ottiene che la tensione di ogni punto della linea alla distanza x dal secondario del primo trasformatore è:

$$\mathrm{V} = \mathrm{V}_1 \frac{\mathrm{N}_2}{\mathrm{N}_1} \left\{ 1 + \frac{\mathrm{L}\,\mathrm{C}m^2}{2} \left(2\frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right) \right\}.$$

Tale tensione cresce lungo la linea fino al valore massimo in corrispondenza dell'estremo. Tale aumento è rappresentato da:

$$(\mathrm{V})_{x=l} - (\mathrm{V})_{x=0} = (\mathrm{V})_{x=0}\, \mathrm{L} \frac{\mathrm{C}m^2}{2}.$$

La corrente nel cavo vale:

$$\mathrm{I} = \mathrm{V}_1 \frac{\mathrm{N}_2}{\mathrm{N}_1} \mathrm{C}m \left(1 - \frac{x}{l} \right)$$

che diminuisce col crescere di x e si annulla per

$$x = l.$$

La perdita per effetto ohmico della linea risulta nelle ipotesi suesposte

$$\mathrm{W} = \frac{1}{3} \mathrm{R}\, \mathrm{V}^2_1 \frac{\mathrm{N}^2_2}{\mathrm{N}^2_1} \mathrm{C}^2 \overline{2\pi n}^2.$$

Digitized by Google

Cotesta relazione risulta più semplicemente dalla considerazione che la corrente di carica è decrescente dal punto di origine al punto estremo della linea, dove è nulla.

Il suo valore massimo I_c vale:

$$I_c = V_1 \frac{N_2}{N_1} 2\pi nc$$

ed il suo valore in ogni punto del conduttore è proporzionale alla lunghezza del tratto di linea che precede, cioè:

$$i_c = Kr \quad I_c = K R.$$

Il valore della resistenza x per cui a corrente costante si ha la stessa perdita che nel caso in questione, in cui la corrente è variabile da punto a punto, risulta dalla relazione

$$x I^2_c = \int_0^R i^2_c \, dr$$

da cui:

$$x = \frac{R}{3}$$

e quindi la precedente relazione.

II. — *Caso in cui la linea porta corrente di lavoro.*

Quando la linea porta corrente di lavoro, la intensità di corrente in un punto qualunque della linea risulta:

$$I = \frac{V_1}{m L_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{1}{r_4 + R \frac{L_4}{L_2}}$$

$$\sqrt{(m L_4 + r_4 \operatorname{sen} m t')^2 + r^2_4 \left[(L_2 C m^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right) - \cos m t' \right]^2}$$

per $x = 0 \quad i = i_2$ per $x = l \quad i = i_3$.

La perdita in linea è espressa da:

$$W = \frac{R}{l} \int_0^l I^2 \, dx$$

Digitized by Google

cioè:

$$W = R\left(\frac{V_4}{m\,M_{3,4}}\right)^2$$

$$\left\{1 + \left(\frac{m\,L_4}{r_4}\right)^2 + 2\,\frac{m\,L_4}{r_4}\,\text{sen}\,m\,t' + \frac{1}{3}\,(L_2\,C\,m^2)^2 - (L_2\,C\,m^2)\cos m\,t'\right\}.$$

Nella espressione superiore la influenza della capacità è limitata ai due ultimi termini che rappresentano appunto la parte della perdita influenzata dalla capacità:

$$d\,w = R\left(\frac{V_4}{m\,M_{3,4}}\right)^2 \left\{\frac{1}{3}\,(L_2\,C\,m^2)^2 - L_2\,C\,m^2\cos m\,t'\right\}.$$

Se la tensione V_4 del secondario del trasformatore T_4 viene mantenuta costante, la grandezza $d\,w$ è costante per ogni valore del carico.

Il suo valore può, a seconda del rapporto di $\frac{1}{3}\ L_2\,C\,m^2$ a $\cos m\,t'$, essere positivo, nullo o negativo, cioè la capacità può avere azione di elevare, lasciare inalterata e diminuire la perdita a seconda del segno della differenza

$$\frac{1}{3}\ L_2\,C\,m^2 - \cos m\,t'.$$

La determinazione della economia di perdita in linea può quindi farsi in modo molto esatto in ogni caso particolare, in cui si conoscano le caratteristiche degli apparecchi inseriti nella linea.

***

Possiamo però considerare una soluzione approssimata del problema che tenga conto del fattore di potenza dell'impianto utilizzatore e che in modo globale comprenda tali caratteristiche e che introduca gli elementi risultanti dalla costruzione del cavo.

Si debba alimentare mediante la linea in questione un impianto utilizzatore a cui spetta un determinato $\cos\varphi$ e a cui competa per tale fattore di potenza, l'intensità di corrente I.

Digitized by Google

Alimentando detto impianto coll'uso di un cavo, introduciamo in derivazione rispetto alla centrale generatrice una capacità che assorbe la corrente di capacità Ic, in opposizione rispetto alla $I \operatorname{sen} \varphi$ dovuta alla induttanza del circuito utilizzatore.

La corrente di capacità nei cavi. — Il valore della corrente di capacità è strettamente collegato colle dimensioni del cavo e può essere espresso in loro funzione.

Consideriamo il caso più generale, che si riferisce ad un cavo unipolare, le cui dimensioni sono quelle risultanti dalla applicazione della regola della distribuzione dei potenziali.

Per tali cavi: (1)

$$\log_e \frac{R}{r} = \frac{V}{rs}. \qquad [1]$$

La capacità del cavo unipolare espressa in Mcf. Kmt. vale

$$c = \frac{\varepsilon}{18 \log e \frac{R}{r}}$$

essendo ε la costante dielettrica del materiale.

Introducendo in cotesta espressione gli elementi di dimensione del cavo risulta:

$$C = \frac{\varepsilon r s}{18 V} \text{ mcf. Kmt.} \qquad [2]$$

cioè: la capacità di un cavo unipolare è funzione lineare diretta del raggio del conduttore, ed inversa del potenziale di esercizio.

Si può tracciare la serie delle rette che per ogni potenziale determinano in funzione del raggio del conduttore la capacità di ogni cavo (fig. 15).

Il prodotto $\varepsilon . s$ è la caratteristica del materiale isolante, che ne definisce sia le proprietà di capacità che di resistenza alla perforazione.

La figura 16 segna per vari raggi e per ogni tensione di esercizio i valori della capacità per la costante dielettrica eguale ad 1.

La corrente di carica relativa al potenziale V applicato tra

(1) Vedi parte I.

Digitized by Google

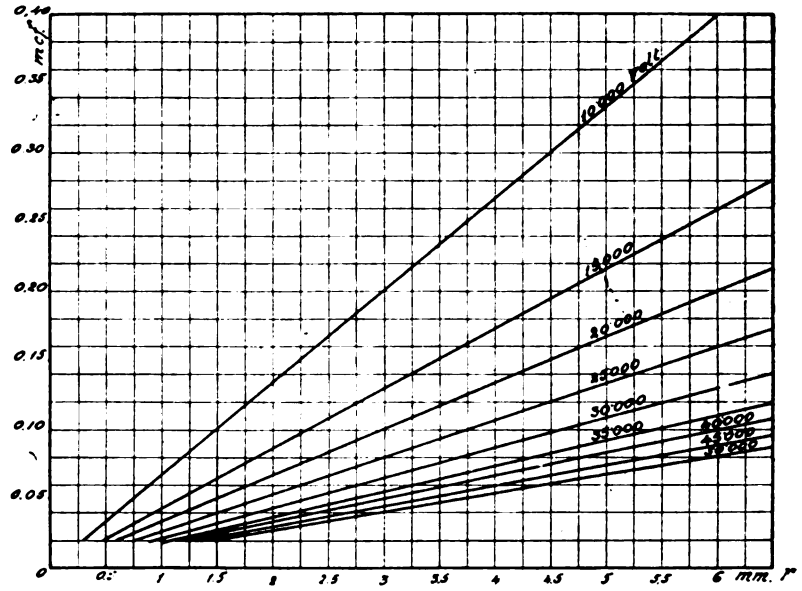


Fig. 15.

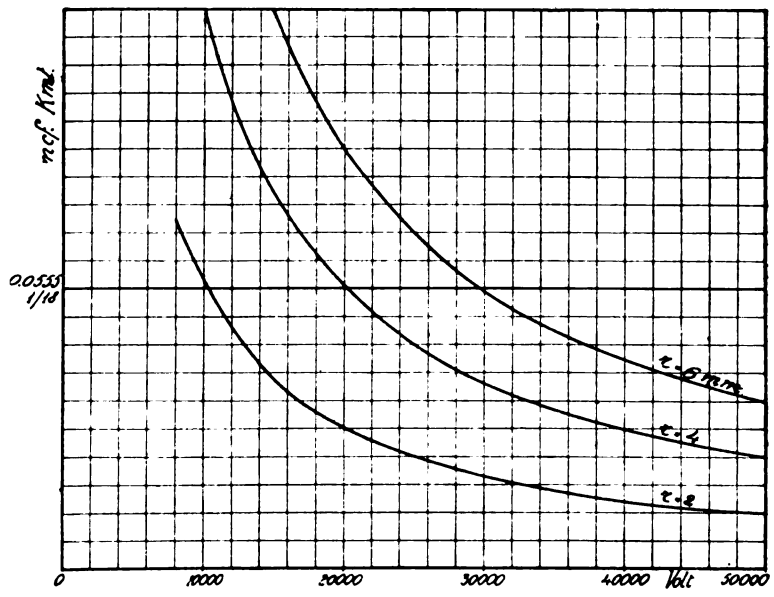


Fig. 16.

Digitized by Google

il conduttore e lo involucro esterno, per la frequenza n è espressa da:

$$I_c = 2\pi n V C l 10^{-6} \text{ ampere}$$

e per corrente trifase:

$$I_c = 2\pi n \frac{V}{\sqrt{3}} C l 10^{-6} \text{ ampere};$$

introducendo il valore della capacità della [2]

$$I_c = \frac{2\pi n}{18} \varepsilon s r l 10^{-6}$$

e facendo la costante:

$$\frac{2\pi n}{18} \varepsilon s 10^{-6} = P$$

risulta:

$$I_c = P r \text{ per Kmt.}$$

di lunghezza di cavo.

Cotesto risultato indica che la corrente di carica è nel cavo funzionante alla tensione per cui è isolato, indipendente dalla tensione di linea ed è funzione lineare del raggio del conduttore, cioè è per ogni cavo una caratteristica del cavo stesso.

Cotesta considerazione semplifica molto la trattazione del problema della influenza della corrente di carica, e può condurre a delle relazioni generali.

Tra i vari cavi è particolarmente interessante quello che per ogni determinata tensione corrisponde al diametro esterno minimo.

Per tali cavi il rapporto $\frac{r}{V}$ è una costante, corrispondente alla condizione

$$r = \frac{V}{s},$$

la capacità che è funzione lineare di tale rapporto è una costante per ogni cavo, qualunque ne sia il raggio del conduttore e la tensione di esercizio.

Introducendo tale valore nella (2) risulta che tale capacità

Digitized by Google

è sola funzione della costante dielettrica del materiale isolante e vale in mcf. per Kmt.

$$\frac{\epsilon}{18}$$

per la carta impregnata

$$C = \frac{3}{18} = 0{,}166 \text{ mcf. Kmt.}$$

Poichè altrove è dimostrato possibile ed è conveniente per cavi ad alta tensione di realizzare tale condizione di diametro minimo, si può ritenere che cotesta sia una costante relativa alla trasmissione in cavi.

Nella figura 16 la parallela condotta all'asse delle ascisse in corrispondenza alla ordinata $\frac{1}{18} = 0{,}055$ taglia la famiglia delle curve relative ai vari raggi in questione in punti, i quali determinano senz'altro per ogni potenziale i valori di r per cui R è minimo.

La corrente di carica competente al cavo di diametro minimo è direttamente proporzionale alla tensione di esercizio ed alla frequenza senza alcuna influenza delle dimensioni del cavo stesso e vale per Kmt.

$$I_c = 2\pi n \frac{\epsilon}{18} V 10^{-6}.$$

***

Determinati così i valori della capacità e della corrente di capacità in funzione degli elementi costruttivi del cavo, consideriamo la loro influenza nelle lunghe linee di trasmissione.

Nella figura 17 il vettore O A rappresenta la intensità di corrente all'estremo della linea, in ritardo dell'angolo φ, rispetto alla direzione O V della tensione; O C ed O D in quadratura colla OV, ed in opposizione tra loro, rappresentano rispettivamente la componente magnetizzante della corrente e la corrente di capacità.

Per un dato cavo e per ogni carico di determinato $\cos\varphi$, il valore della corrente I′ risultante della I (competente alla potenza V I $\cos\varphi$) e della corrente i_c, si determina fissando il

Digitized by Google

punto B di incontro del vettore parallelo alla OA, condotto per il D coll'asse delle V.

Il vettore OB rappresenta la I′ e l'angolo da essa fatto colla OV rappresenta il nuovo fattore di potenza riferito alla centrale φ'.

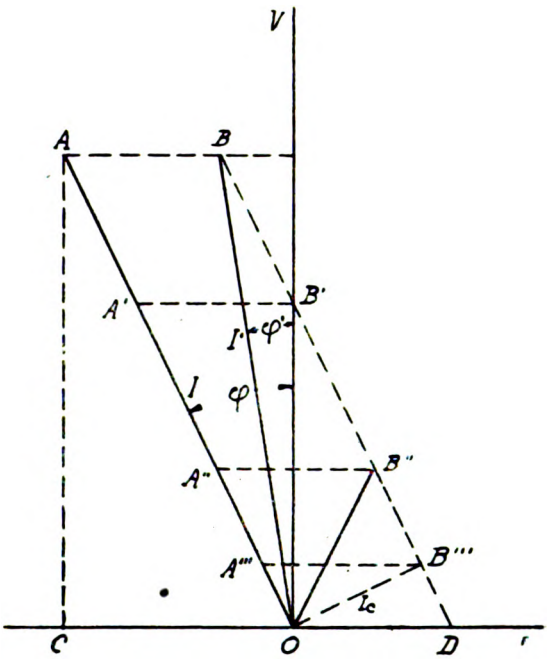


Fig. 17.

Dagli elementi della figura è fissata la condizione che

$$I \cos \varphi = I' \cos \varphi'$$

risulta che

$$\cos \varphi' = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I \operatorname{sen} \varphi - I_c}{I \cos \varphi}\right)^2}} \qquad [3]$$

Tale $\cos \varphi'$ è variabile col carico assorbito dall'impianto e particolarmente il suo valore è 0 nel funzionamento a vuoto, cioè per $I = 0$ essendo allora tutta la corrente di capacità.

Per valori crescenti della I il $\cos \varphi$ cresce, mantenendosi la I′, corrente risultante, in avanzo rispetto alla tensione.

Digitized by Google

Si ha la condizione di $\cos\varphi = \cos\varphi'$, ma per φ' in avanzo, quando $I = \frac{Ic}{2 \operatorname{sen} \varphi}$ come risulta dalla costruzione e dalla [3].

Ciò corrisponde pure ad avere la componente di reattanza della corrente di grandezza metà della corrente di capacità.

Si ha la condizione di fattore di potenza risultante eguale ad 1 per $I = \frac{Ic}{\operatorname{sen} \varphi}$ cioè per $OC = OD$. Tale punto è quello corrispondente al punto di incontro della parallela alla I, condotta da D, coll'asse delle V. Per ogni cavo la lunghezza di linea per cui si realizza tale condizione, è fissata da:

$$l = 18 \frac{I \operatorname{sen} \varphi}{2 \pi n \epsilon s r} 10^6 \text{ Kmt.}$$

Per vari valori di $\cos\varphi$ compresi fra 0,71 e 0,95 è stata determinata per i valori di r la lunghezza di linea in Kmt., per cui si realizza in centrale la condizione di $\cos\varphi' = 1$ per $I = 100$ ampère ed i risultati sono rappresentati dalle curve a fig. 18.

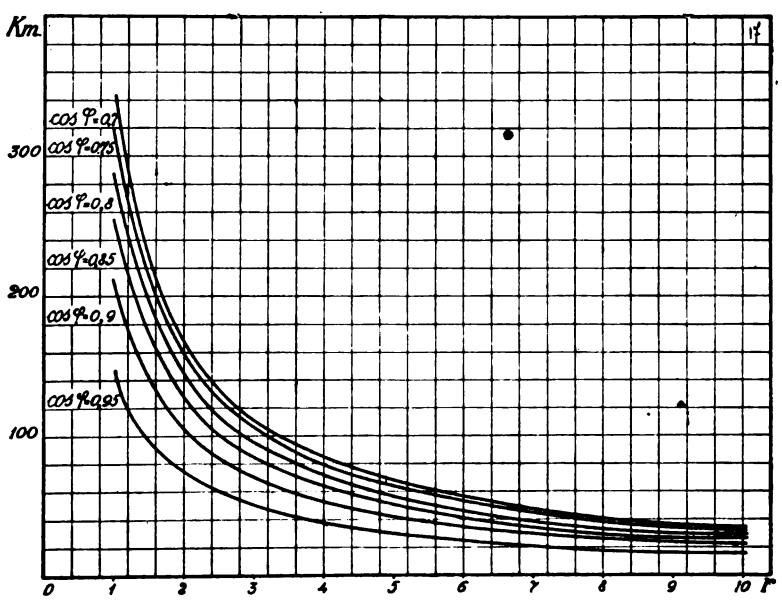


Fig. 18.

Per valori superiori di I la I' si mantiene in ritardo rispetto alla V ed il $\cos\varphi'$ viene crescendo tendendo asintoticamente

Digitized by Google

al valore $\cos\varphi' = \cos\varphi$. La espressione [3] ci fa appunto riconoscere che si ha $\cos\varphi' = \cos\varphi$ per i due valori di I:

$$I = \infty \quad \text{ed} \quad I = \frac{Ic}{2 \operatorname{sen}\varphi}.$$

Si può tracciare per ogni linea e per ogni valore del $\cos\varphi$ competente all'impianto utilizzatore la curva del $\cos\varphi'$; la fig. 19 dà appunto tale curva per due linee diverse, per $\cos\varphi = 0{,}8$.

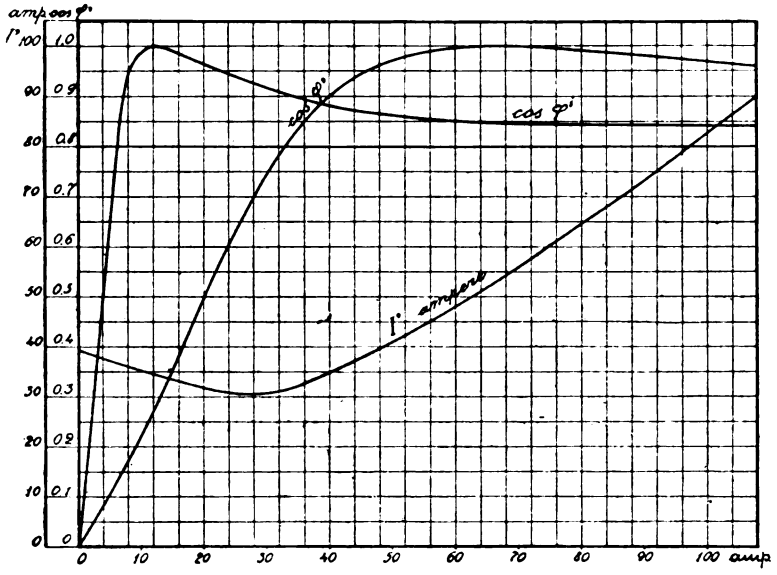


Fig. 19.

Dall'origine la curva sale rapidamente fino all'ordinata massima 1, per discendere poi e tendere asintoticamente alla parallela all'asse delle ascisse, di ordinata $\cos\varphi$ che taglia prima la curva nel punto di ascissa $I = \frac{Ic}{2 \operatorname{sen}\varphi}$.

Col diminuire del $\cos\varphi$ dell'impianto alimentato si raggiunge per valori sempre più bassi del carico la condizione di $\cos\varphi = 1$ e quindi aumenta l'azione favorevole del cavo, in quanto che per valori superiori di questo valore della corrente il $\cos\varphi$ risultante in centrale si mantiene sempre superiore al valore terminale.

Col crescere della potenza della linea si estende ugualmente il limite per cui il fattore di potenza in centrale diminuisce.

Digitized by Google

Per impianti di trazione elettrica, i valori di $\cos\varphi$ basso e di grande carico sono particolarmente realizzati.

***

Interessa in modo speciale di determinare la variabilità di I': corrente all'origine della linea in cavi

$$I' = \frac{I \operatorname{sen}\varphi - I_c}{\operatorname{sen}\varphi'} .$$

Tale corrente è rappresentata dai vettori, che hanno origine in O ed il loro estremo sulla BD. Per l'intervallo BB'' il valore di I' è sempre minore di I, ma la relativa differenza viene costantemente diminuendo fino alla condizione di $I' = I$ che si ha per $\cos\varphi = \cos\varphi'$ e per $I = \frac{I_c}{2 \operatorname{sen}\varphi}$ corrispondenti al vettore OB''; la I' è però in avanzo.

Al di là di questa regione il valore di I' diventa maggiore di I.

Il valore minimo di I' si ha per OB''' corrispondente alla normale condotta per O alla BD.

Tale valore è

$$I' = I_c \operatorname{sen}\varphi'$$

ovvero anche

$$I' = I_c \cos\varphi$$

e per

$$I = I_c \cos\varphi \operatorname{tang}\varphi$$

come per

$$\varphi' = 90 - \varphi.$$

Poi la I' cresce nuovamente fino a raggiungere il valore di corrente a vuoto I_c.

Nella figura 19 sono segnate le curve rappresentanti i valori di I' per la linea considerata in nota (1) e per $\cos\varphi$ uguale a 0,8.

---

(1) Per la linea di Chiomonte-Torino dell'impianto elettrico municipale della Città di Torino abbiamo considerato la curva dei $\cos\varphi'$ col carico crescente.

La capacità del cavo corrispondente alla sezione di conduttore eguale a quella linea aerea è per il cavo unipolare di 0,0752 mcf. per Kmt.

Digitized by Google

È palese la forma caratteristica dell'andamento di I'.

Per la linea considerata e per $\cos\varphi = 0{,}8$ si ha eguaglianza di I con I' per il valore di $I = 33{,}05$ e ciò precisamente quando $\cos\varphi = \cos\varphi'$.

Il valore minimo di I' è per $I = I_c \cos\varphi \operatorname{tang}\varphi$.

Per il carico massimo in luogo di

$$I = 61 \qquad \text{si ha solo} \qquad I' = 48{,}8$$

precisamente $I' = 0{,}8\, I$.

La diminuzione di I è grandemente importante per i generatori, in quanto che essi sono proporzionati per la corrente di massimo carico corrispondente al $\cos\varphi$ risultante in centrale, per cui coll'uso dei cavi si fa una reale economia nel costo del macchinario generatore.

Interessa però particolarmente di conoscere quale economia di esercizio si realizza in linea per effetto della minore intensità di corrente.

Nel funzionamento a carico la corrente è crescente con va-

La corrispondente corrente di capacità a 50 periodi e per 50000 Volt di tensione concatenata è $i_c = 0{,}708$ ampere per Kmt. e per 56 Kmt.

$$I_c = 39{,}669 \text{ ampere.}$$

Per coteste costanti il valore del carico per cui si ha il $\cos\varphi' = 1$, è di 66,1 ampere, supponendo il $\cos\varphi$ dell'impianto alimentato eguale a 0,8. Tale valore è molto prossimo al valore della corrente di pieno carico che è di ampère 61.

Si ha di nuovo il $\cos\varphi' = 0{,}8$, ma per corrente in avanzo, per ampere 33,05; per carico minore il $\cos\varphi'$ viene costantemente diminuendo fino a 0 per $I = 0$.

Il fattore di potenza per ogni impianto è però molto variabile e bene spesso inferiore a 0,8. Nello stesso impianto municipale di Torino tale $\cos\varphi$ si abbassa fino a 0,7.

Abbiamo riassunto nella seguente tabella per quali valori di I si ha in corrispondenza dei vari $\cos\varphi$ il $\cos\varphi' = 1$.

$\cos\varphi$	$\operatorname{sen}\varphi$	I
1	0	∞
0,95	0,31	127,93
0,90	0,43	92,23
0,85	0,53	74,81
0,80	0,60	66,10
0,75	0,66	60,09
0,70	0,71	55,86
0,65	0,76	52,18
0,60	0,80	49,57.

Digitized by Google

riazione lineare dalla centrale, in cui ha il valore I' fino all'estremo ricevitore, dove vale I.

Mentre nel caso della linea aerea la perdita per effetto Joule vale RI^2, nel caso delle linee in cavo in cui la corrente di capacità decresce dall'origine all'estremo la perdita è:

$$W = \left[\left(\frac{I' + I}{2}\right)^2 + \frac{(I - I')^2}{12}\right] r$$

e la economia risulta:

$$dw = r\left[I^2 - \left\{\left(\frac{I + I'}{2}\right)^2 + \frac{(I - I')^2}{12}\right\}\right].$$

Abbiamo calcolato con riferimento alla linea, finora presa in considerazione, tale economia, ed i risultati sono illustrati dalla figura 20.

Le ascisse si riferiscono alle intensità di corrente e le ordinate rappresentano la differenza tra le perdite della linea aerea e quelle nella linea in cavi.

Tale economia è positiva per i valori della corrente erogata all'impianto utilizzatore superiori a

$$I = \frac{I_c}{2 \operatorname{sen} \varphi}$$

per cui è nulla essendo $I = I'$.

Però a vuoto e per minori valori della corrente tale economia è negativa. Per una più esatta valutazione del maggiore rendimento della trasmissione in cavi devesi estendere il dw a tutto il diagramma giornaliero del carico.

Per una centrale idroelettrica in cui nei casi di minore richiesta di carico si ha energia sovrabbondante, risulta sempre il vantaggio della maggiore potenza disponibile coi cavi nei casi di maggior carico.

Nel caso di una centrale termica non si può in linea generale affermare quale sia il risultato della integrazione del carico, qualora la centrale funzioni lungamente a vuoto; ma si ha motivo di ritenere che nella maggioranza dei casi si avrà reale economia in quanto che la perdita a vuoto è una piccola percentuale della potenza dell'impianto. Nel caso dell'impianto di Chiomonte è del 2,7 ‰.

Digitized by Google

Per grandi potenze l'economia di energia nel funzionamento a carico è sensibile.

Per una linea in cavi della lunghezza di 75 Kmt. ed una potenza massima di 20.000 Kw. con un $\cos \varphi = 0{,}85$ a 50.000 Volt e per una sezione di 125 mmq. la perdita in linea è di

$$749 \times 3 = 2247 \text{ Kw.}$$

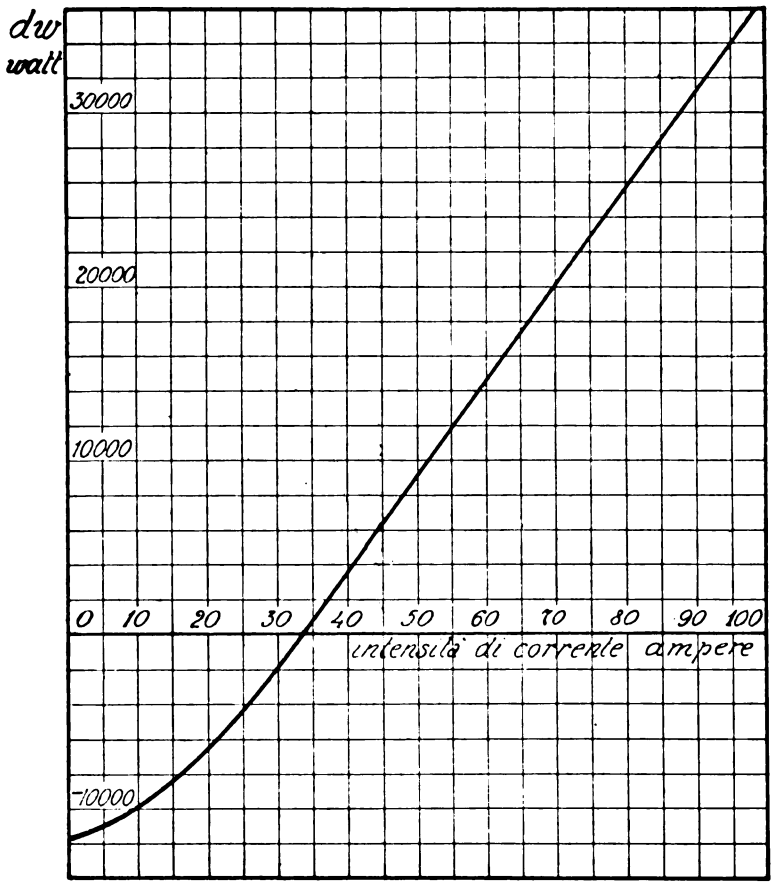


Fig. 20.

La corrente di carica è di 110 ampere, per una capacità chilometrica di 0,166 mcf.

La perdita in linea a pieno carico diventa per effetto di tale corrente di carica 1950 Kw. con una economia di 397 Kw. di fronte alle perdite nella linea aerea; circa 17.

Digitized by Google

Cotesta economia nelle perdite di linea è però quasi totalmente compensata dalle perdite inerenti alla isteresi del dielettrico ed alle perdite negli involucri metallici dei cavi.

Possiamo quindi concludere che rispetto alla centrale è di certo giovamento l'uso dei cavi, mentre le perdite in linea alle frequenze alte sono dello stesso ordine di quello delle linee aeree.

Per le basse frequenze si ha pure una sensibile economia nelle perdite di linea.

Rispetto alla centrale è da considerarsi l'effetto di sopraelevazione della tensione ai generatori ed ai trasformatori all'atto della inserzione della capacità del cavo — debbono provvedere a mantenere la tensione costante gli appositi regolatori.

***

Per quanto riguarda la sicurezza di funzionamento delle canalizzazioni sotterranee, in paragone di quello delle linee aeree, quando si sia provveduto a quell'ampio coefficiente di sicurezza che deve tenere conto delle sopraelevazioni di tensione competenti normalmente nel funzionamento a vuoto alla distribuzione di potenziale in tale condizione e relativi alle brusche variazioni di carico in circuito, si può ritenere con riferimento alle numerose notizie che si hanno su reti di cavi ad alta tensione, che la canalizzazione sotterranea, quando venga convenientemente posata e venga estesa in modo completo dalla centrale alla stazione ricevitrice, offra un ben maggiore grado di sicurezza che non la linea aerea e giovi pure alla protezione del macchinario, in quanto che sottrae completamente l'impianto all'effetto delle scariche atmosferiche come dei corti circuiti od interruzioni, che sono inevitabili alla linea aerea, specialmente durante anormalità atmosferiche.

***

In merito agli attuali limiti di applicabilità dei cavi per energia possiamo concludere che:

I limiti costruttivi permettono la costruzione di cavi per tensioni alquanto superiori a quelle massime fino ad ora adot-

Digitized by Google

tate, pure applicando un largo coefficiente di sicurezza — le tensioni limiti sono molto prossime alle più elevate tensioni nelle linee primarie dei più moderni impianti;

I limiti di costo limitano grandemente nel caso generale la applicazione dei cavi in luogo delle linee aeree, ma consentono però in molteplici casi particolari la applicazione delle linee sotterranee, specialmente in considerazione delle minori spese di esercizio loro competenti.

Le considerazioni della economia e sicurezza di esercizio non debbono limitare l'uso dei cavi, che anzi in molti casi speciali di impianti a bassa frequenza ed in particolare modo per la corrente continua, l'uso dei cavi è conveniente.

I limiti attuali alla applicazione dei cavi per energia sono pertanto superiori a quelli corrispondenti alle odierne applicazioni, e tutto fa credere che le ricerche nel campo sperimentale e gli studi nel campo scientifico abbiano ad estendere in modo notevole per l'avvenire cotesti limiti.

Debbo un sentito ringraziamento alla Direzione della Società An. Ing. V. Tedeschi ed al relativo personale per i dati e l'aiuto fornitimi nella compilazione della presente comunicazione.

E. S.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

La technique de la construction des câbles souterrains pour transport d'énergie a été perfectionnée sensiblement dans ces dernières années soit technologiquement dans les procédés de fabrication des matériaux isolants, soit dans les méthodes de calcul qui ont été comparées avec les résultats de nombreuses expériences systématiques.

L'Auteur résume les résultats actuels de la fabrication des câbles et expose rapidement les théories fondamentales du calcul.

En considération du progrès réalisé dans cette technique l'on peut se poser la question de savoir si les câbles souterrains ne seraient pas à employer, outre des réseaux des villes, pour les longues lignes de transmission à haute tension.

L'Auteur se pose la question des limites à cette application, qui peuvent se diviser en trois classes, savoir:

Limites imposées par la fabrication;

Limites économiques;

Limites de sécurité de fonctionnement.

Les limites imposées par la fabrication sont illustrées en considérant les tensions et les puissances pour lesquelles on peut utiliser les câbles triphasés et unipolaires soit avec des diélectriques homogènes soit avec des diélectriques gradués en capacité. L'auteur donne les courbes limites qui servent à déterminer les sections et les tensions pour maximum d'utilisation.

Les limites économiques font objet d'une analyse spéciale dans le but de déterminer les prix des câbles en relation avec les données de puissance et de tension et de fixer les conditions de minimum.

Les prix spécifiques par kilovolt-ampère sont calculés pour des séries de câbles à section constante et à tension variable et pour des séries de câbles à tension constante et à section variable.

L'application de l'aluminium comme conducteur est analysé particulièrement dans le cas des câbles à très haute tension; des relations générales et des diagrammes sont donnés qui permettent de déterminer d'une façon générale l'aptitude de ce métal à la constitution des câbles.

Digitized by Google

L'Auteur pose la question de la comparaison des prix des longues lignes en câbles avec ceux des lignes aériennes, et quoique d'une façon générale les prix du système aérien soient pour les hautes tensions inférieurs à ceux du système à câbles, il se présente des cas particuliers illustrés par des exemples, dans lesquels l'adoption du système à câbles peut être aussi avantageuse.

L'étude du fonctionnement des longues lignes en câbles affecte en même temps les considérations économiques en vue du rendement qui peut être augmenté par l'effet de la capacité des câbles et les considérations de la sécurité de l'installation.

L'action de la capacité sur l'économie de la distribution est discutée en considérant les relations générales déterminant les pertes en ligne dans le cas de câbles et de lignes aériennes; cet examen conduit à établir des expressions simples qui, en fonction des éléments constructifs des câbles, fixent les lois de variation de ces pertes.

L'Auteur considère enfin rapidement, en vue du rapport spécial présenté sur le même argument au Congrès par un autre Auteur, les limites imposées à l'emploi des câbles par la sécurité de l'exploitation en raison de phénomènes de surtension d'origine intérieure et extérieure.

La conclusion en est que les limites actuelles d'emploi des câbles sont certainement supérieures à celles de leurs applications actuelles et que les recherches expérimentales et les études dans cette voie vont étendre certainement ces limites actuelles pour répondre aux progrès des installations à haute tension.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. J. DELON (Lyon) *prend la parole pour dire qu'il juge trop élevés les coefficients de sûreté admis par M. Soleri dans sa communication; il croit en conséquence, que les limites des câbles peuvent être plus élevées que ne l'indiquent les chiffres fixés par la Communication.*

M. Soleri répond qu'il a choisi comme base de ses calculs pour câbles à haute tension le coefficient de sûreté 4, parce qu'il croit que ce coefficient qui se rapporte à la résistance de perforation vis-à-vis de la tension de service est nécessaire non seulement pour les phénomènes de surtension, mais surtout pour tenir compte de la durée du câble et du manque d'homogénéité malheureusement inévitable dans l'isolant.

Il est d'accord avec M. Delon que les coefficients 6 et 8 demandés quelques fois sont absolument exagérés, mais il confirme que la pratique qu'il possède de la question l'engage à conseiller d'admettre toujours un coefficient de l'ordre qu'il a adopté dans son étude.

Digitized by Google

NOTA BIBLIOGRAFICA

APT R. — *Hochspannungskabel und Hochspannungskraftübertragungen.* E. T. Z., 20 febbraio 1908.

BIRRENBACH H. & HÖCHSTAEDTER M. — *Hochspannungskabel mit einem neuem Kabelschutzsystem und deren Garantieprüfung für 25.000 V. Betriebsspannung.* E. T. Z., pag. 789, 1911.

BOREL A. — *Quelques notes sur les câbles électriques souterrains.* Schweiz. Elektr. Verein, pag. 301, 1910.

DEL BUONO U. — *L'impiego dell'alluminio come conduttore elettrico.* Atti della A. E. I., Fasc. 3°, 1909.

DE MARCHENA. — *Les canalisations souterraines.* Congrès International des Applications de l'électricité, Marseille I°, 1908.

EMANUELI. — *Ricerche sperimentali sulle perdite del dielettrico.* Atti A. E. I., Vol. XIII.

FERNIE F. — *Electric Cables.* Electrician, 14 ott. 1910.

FISCHER H. W. — *Electric Cables.* A. I. of E. E., ott. 1908.

FLOY H. — *Die Isolation von Hochspannungserdkabeln.* E. T. Z., dic. 1908.

GORMANN O. — *Insulation and cables.* A. I. of E. E., pag. 621, 1901.

HÖCHSTAEDTER M. — *Die dielektrischen Eigenschaften moderner Hochspannungskabel mit Rücksicht auf die Verwendung von Kabeln für Spannungen über 20.000 V.* E. T. Z., pag. 467, 1910.

HUMANN P. — *Ueber Hochspannungskabel.* E. T. Z., 15 dic. 1910.

JONA E. — *I materiali isolanti per cavi ad alta tensione.* Atti Congresso St. Louis, 1904.

LICHTENSTEIN L. — *Beiträge zur Theorie der Kabel.* Monografia.

LICHTENSTEIN L. — *Ueber den gegenwärtigen Stand und die nächsten Aufgaben der Hochspannungskabelstechnik.* E. T. Z., pag. 208, 1911.

LICHTENSTEIN L. — *Ueber die neuesten Fortschritte in der Fabrikation der Hochspannungskabeln.* E. T. Z., pag. 773, 1910.

LOMBARDI L. — *Sull'impiego dei condensatori nelle trasmissioni di energia elettrica.* Annuario Museo industriale, 1908-09, Torino.

LOMBARDI L. — *Condensatori elettrici per alta tensione.* Atti della A. E. I., Fasc. 3°, 1904.

MONASCH. — *Annuario di fisica.* Vol. 22, pag. 905, 1907.

Digitized by Google

OSBORNE H. & H. PENDER. — *Potential stresses in dielectrics.* A. I. of E. E., pag. 1593, 1910.

RUSSEL A. — *The dielectric strength of insulations materials and of cables.* Electrician, 15 nov. 1904.

RUSSEL A. — *The theory of electric cables and Networks.*

SCHWEITZER E. O. & JUNKERFELD. — *High potential Underground Transmission.* A. I. of E. E., ott. 1908.

SOLERI E. — *L'uso dell'alluminio come conduttore dell'elettricità.* Elettricità, N° 10-13, 1909.

STEINMETZ. — *Transient Current Phenomena and oscillations.*

TEISSIER DU CROS. — *Note sur l'emploi de l'aluminium dans les canalisations souterraines.* Lumière Électrique, 21 ott. 1908.

TESSARI A. — *Energia ricuperata nelle linee di trasmissione di energia elettrica per mezzo dei condensatori.* Atti dell'A. E. I., Vol. VI, Fasc. I, 1902.

WEBER H. F. — *Energie-Uebertragungen Lauffen-Frankfurt.* Offizieller Bericht über die internationale Elektrotechnische Ausstellung in Frankfurt. J. D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Mein, 1894.

Digitized by Google

Development of Electrical Installations in Japan.

Dr. Osuke Asano

Director of the Electrotechnical Laboratory

Chief Engineer of the Electrical Exploitation Bureau, Ministry of Communications.

Chapter I.

Electric Light and Power Supply.
Early History of Electric Supply Industry.

While the history of the development of our electric lighting and power industry, so far as its relations to the public is concerned, belongs to the preceding twenty-five years, the problem regarding the artificial production of electricity was deeply studied by various investigators and experimenters of early Japan, though its scope and application was exclusively limited to medical purposes.

In 1770 Gennai Stirager prepared some form of electrostatic machine, which is believed to have been the first electrical appliance ever introduced into our country.

He is also said to have completed a kind of primary battery. At the end of the last century, the subject of public illumination by electrical energy, combined with the increased resort to electric generators for sources of electric current, engaged the attention of our influential business men and engineers. The general tendency in that direction in foreign countries at those times was closely followed.

Digitized by Google

It deserves mention that the Tokyo Electric Light Company was not only the pioneer of all of our modern electrical installations, but remains even at the present time one of the largest supply works now in operation. The company was established with an initial capital of £. 20,000 in Febr. 1883 for the purpose of undertaking the first commercial supply of electric light to the city of Tokyo.

The original system of distribution included an Edison three wire direct current distribution, from five generation stations scattered about the city.

The generating equipment consisted of a number of Edison generators and three 45-light arc-machines made by the Brush Co.

The whole plant was operated by steam and commenced working in Nov. 1887 with an aggregate capacity of 405 kW.

Prior to the commencement of the first supply of electricity an attempt was made by the Company to employ an arc light of 3,000 cp. with the help of an American engineer of the Brush Electrical Engineering Company, who happened to be sent here for the purpose of introducing a generator of his Company's manufacture.

This was perhaps the first electric lamp ever exhibited to the public in our country.

Shortly after this introduction of an arc lamp, Dr. Fujioka, taking advantage of the opening of the Tokyo Bankers' Club, startled the whole assembly by the unprecedented brilliancy of forty incandescent lamps, the current for which was supplied by a generator manufactured in the country.

The first alternating current distribution in Tokyo was started in 1890 with the installation of a Brush 1000 volt single-phase alternator. The Company then began to give a supply of both kinds of current, continuous and alternating.

The electric supply in Tokyo was soon followed by another in the city of Kobe in Sept. 1888. The installations comprised four 30 kW. units of Edison make, supplying current to incandescent lamps connected to 3 wire networks.

These striking successes in public illumination led to an immense number of new enterprises of this character throughout the country, and the large cities and towns such as Osaka, Kioto, Nagoya (all in 1889) etc. had electric lighting installed in rapid succession.

The adaptability of alternating current to general distribution

Digitized by Google

work was not recognised until the Osaka Electric Light Company commenced the supply with a Thomson Houston 1000 volts single phase alternator in May 1889.

In view of the primitive state of our central station industry at that time, it deserves special mention that the Engineer-in-chief of the Company insisted upon the adoption of alternating current distribution, disregarding the general tendency towards continuous current which prevailed even in progressive foreign countries.

Many people will not have forgotten that about that time Mr Ferranti met with much criticism installed for his having a 11,000 volt alternating current distribution for public lighting in London.

By keeping pace with the ever increasing tendency to alternating current distribution, the Company has made phenomenal progress during the past twenty years, showing an increase in capacity from 375 kW. in 1891 to 23,655 kW. in 1911, more than sixty times.

The following table has been prepared to give some information regarding the miserable state of development in the early period of our central station industry.

Digitized by Google

TABLE I. — **Electricity Supply Undertakings.** — 1894.

Name of Company	Date of commencement of supply	Prime mover	Authorised Capital	Paid up Capital	Kind of Current	Number of generating stations	Dynamos				Lamps	
							for Glow lamps		for arc lamps			
							Number of Units	Total kW.	Number of Units	Total kW.	Glow lamps of 10 c. p.	Arc lamps of 1200 c. p.
Tokyo El. Light Co.	Dec. 1887	Steam	£ 83,565	£ 66,852	⎓	5	9	757	4	152 arcs	11,913	108
Kobe	Sept. „	„	30,000	10,980	—	1	6	120	—	—	2,400	—
Osaka	May „	„	40,000	32,000	⎓	2	9	335	2	75 arcs	6,539	75
Kyoto	July „	„	10,000	7,000	—	1	4	80	1	40 arcs	1,344	13
Nagoya	Dec. „	„	7,880	7,880	—	1	4	64	—	—	1,800	—
Shinagawa	April „	„	10,000	7,600	∿	1	3	75	—	—	1,500	—
Yokohama	Oct. „	„	17,400	13,600	⎓	1	5	120	—	—	1,700	—
Fukagawa	Dec. „	„	15,000	2,823	—	1	1	325	—	—	808	—
Kumamoto	Aug. „	„	7,500	3,150	—	1	2	32	—	—	860	4
Hokkaido	Nov. „	„	16,000	?	—	1	1	40	—	—	—	—
Feikoku	—	„	?	?	⎓ ∿	1	1	25	—	—	450	—
Nagasaki	—	„	4,000	2,400	—	1	1	325	—	—	—	—
Kyoto Water utilization office . .	May „	Water	25,000	—	—	1	3	160	—	—	—	—

Digitized by Google

Development of Hydroelectric Plant.

As understood in the preceding table, Japan had only one central station working with water power in 1891, which is most striking in view of the present phenomenal hydraulic development. The hydro-electric plant of the Kyoto water utilization scheme was originally designed for power purposes, jointly with the drainage work of lake Biwa, one of the most notable pieces of civil engineering in Japan. It began operation in May 1889 with two sets of General Electric 500 volts direct current generator and 120 HP. Pelton wheel supplying current to two Sprague motors of 5 and 50 HP. and one Edison 30 HP. motor.

The plant has extended year by year until it now has an aggregate station capacity of 1765 kW.

The next year the first hydro-electric plant for public lighting was set in operation at Stakone, a watering place well known to foreigners, which consisted of a 60 HP. American turbine working unter a head of water of 245 ft., a discharge of 30 cub. ft. per sec. and an Edison 125 volts and 25 kW. direct current generator coupled thereto to supply 300 glow lamps.

The rapid progress which has been made during these twenty years has been at such a rate that the use of hydraulic power now far exceeds, in capacity, that of steam power.

TABLE II.

Electric Undertakings, installed and in progress.

Kilowatt capacity, character of load, prime mover — 1909.

Character of Load	Capacity in kW.			
	Water	Steam	Others	Total
Electricity Supply	200,850	57,763	4,813	263,426
Electric Traction	910	16,135	907	17,952
Electric Supply & Traction	5,465	43,600	723	49,788
Isolated plants	42,834	58,926	6,951	108,711
Total kilowatts	250,059	176,424	13,394	439,877

Digitized by Google

In addition to the general prevalence of the central station work, much attention has been paid to private plants for the purpose of furnishing energy to isolated mills, mines, hotels, chemical works, etc.

One of the early installations of this class, which calls for attention as being connected with the history of hydro-electric development in Japan, was a factory electric light installation by the Miyaghi Spinning Co. in 1886.

Though somewhat small in capacity, it may be considered to be the earliest supply of electricity or at least to constitute the very beginning of the present hydro-electric development. It consisted of a 50 kW. direct current generator driven by a 60 HP. reaction turbine as prime mover.

One of the most extensive applications of electricity to mining work is found in the Ashio Copper Mine, its total capacity having been increased to the present amount of 3,760 kW. during the last twenty years.

The following statistics for Nov. 1899 when compared with the statistics in Table II give a very fair idea of the progress made between the early portion and the latter part of the history of our electrical installations.

TABLE III. — **Electric Undertakings.**

Kilowatt capacity, character of load, prime mover — 1899.

Character of Load	Capacity in kW.					
	Water			Steam		
	in operation	in progress	Total	in operation	in progress	Total
Electric lighting	617	466	1,083	7,582	831	8,413
Electric power.	—	11,516	11,516	—	—	—
Electric light & power .	4,405	9,675	14,080	5,582	241	5,923
Electric traction	260	2,276	2,536	670	2,401	3,071
Isolated plant	2,831	713	3,544	9,927	1,371	11,298
Total kilowatts	8,113	24,646	32,759	29,043	28,877	57,920

Digitized by Google

A factor likely to prove of considerable importance to the future development of isolated plants, will probably be the use of electricity in the chemical industry; even though the present state of its development is unfortunately far behind the wonderful progress along these lines which has been made in many foreign countries.

The undertakings of this class, at present in operation, are very few as the following table will show.

TABLE IV. — **Electrochemical Undertakings.**

Name of Company	Date of commencement	Kind of product	Primary power	kW.
Nippon Nitrofertiliser Co.	1909	Lime nitrogen	Water	6,400
Koviyama	1902	Calcium * Carbide	"	500
Spinning Factory	1910	Phosphor	"	200

* There are several Supply Companies which utilise the surplus power for the manufacture of calcium carbide.

Development of Extra high Tension Transmission.

From Table III, in which the statistics of the electric undertakings in 1899 are given, one can easily see that, in spite of the natural advantages our country enjoys, the utilisation of water-power as against steam-power, at that time, did not progress as it should have done.

This was most probably due to the general negligence of the practical possibility of trasmitting power at extra high pressures.

This method was, for a long time, untried until an 11,000 volt 3-phase transmission was put in operation in May 1899 by the Koriyama Silk Spinning Factory in the Prefecture Fukushima. The length of the transmission line was 14 miles.

The power was drawn from Lake Gnawashiro, a Maccornick 520 HP. reaction turbine being used under a head of water of 100 ft. and a discharge of 60 cub. ft. per sec. Two General Electric Co. 60 cycle 3-phase alternators coupled to both

Digitized by Google

ends of the shaft of a single turbine were installed with a total normal output of 300 kW. at a pressure of 2000 volts. This was raised up to the transmission voltage of 11,000 through six 50 kW. units, oil cooled transformers.

From that time the utilization of remote water power has been successfully carried out in rapid succession by many Companies at Hiroshima, Wakayama, Tokyo, etc.

As a typical example of our extra high tension installations now in operation, that of the Tokyo Electric Light Company at Komahashi, about 50 miles west to Tokyo, may be cited.

It was originally designed to be the sole source of supply for an immense number of motors and lights scattered throughout the city of Tokyo, and remains even in the present time one of the most striking examples of hydraulic power plant, not surpassed by any others either of steam or water, in its station capacity, length of transmission line, or line voltage.

The water comes from the River Katsura in a series of canals and tunnels, extending over about 42 miles with a hydraulic gradient from 1/2400 to 1/1200.

The central feature of the generating equipment is the row of six Siemens 3000 kW. 6600 volts 3-phase 50 cycle alternators of revolving field type, direct coupled to a Francis twin water turbine, the speed of operation being 500 revolutions per minute.

The turbine delivers 4500 HP. when working under a head of water of 345 ft. and a discharge of 155 cub. ft. per sec. For the above six units, two 180 kW. exciters driven by Pelton wheels are provided.

The main transforming equipment, by means of which the generator voltage is raised up to the transmission pressure of 55,000 volts, consists of eleven 2000 kW. single-phase water cooled transformers made by the General Electric Co. of America, every three of which are delta connected in their primaries and star in their secondaries.

The 55,000 double circuit transmission line, about 47 miles long, has two independent lines for the respective circuits, each consisting of three 300,000 circular mils stranded copper cables carried on wooden poles. The insulators are of Lock make, tested at 130,000 volts.

The whole installation has been in successful operation since the end of 1907.

Digitized by Google

High tension transmission has also played an important part in steam power plants in the past few years.

The most notable instance of this character is the Ajikawa generating station of the Osaka Electric Light Company.

The plant is intended for a 11,000 volts transmission through underground cables in the city of Osaka, having a nominal output of 15,000 kW. in five equal units of Westinghouse turbo-alternators, wound for the transmission voltage.

Steam is generated in twenty sets of 535 HP. water tube Babcock boilers fitted with chain grate stokers working at a pressure of 160 lbs. per sq. inch.

In addition, the Company has five steam power plants aggregating 8655 kW. and claims to be the largest of the electric installations worked by steam.

The following table contains information in reference to the modern tendency towards electrical transmission.

TABLE V. — **Electric Undertakings.**

Kilowatt capacity, character of load and distribution or transmission voltage - 1909.

Character of Load	Capacity in kW.			
	up to 500 (d. c.) 300 (a. c.)	up to 3500	above 3500	Total
Electricity Supply	794	64,401	194,231	263,426
Electric Traction	5,190	3,122	4,640	17,952
Electric Supply & Traction	1,680	39,758	8,350	49,788
Isolated plants	36,772	39,721	32,219	190,712
Total kilowatts	44,436	156,002	239,440	439,878

Development of power plants, using gas and oil.

It was not until 1904, that power gas began to replace steam power in such places, where the highest cost of small steam plants had precluded the extensive use of electricity.

The first gas engine employed for generating electricity for public supply was a Nash vertical 3 cylinder gasoline motor

Digitized by Google

coupled to a Shibaura 30 kW. 125 volt direct current generator for lighting a town called Uraga, which in Sept. 1907 was followed by a Körting 120 HP. horizontal suction gas engine installed by the Ibaraki Electric Supply Company.

It was connected to a Westinghouse 75 kW. 3-phase alternator for supplying current to electric lights in the City of Mito.

The following table shows that there is a promising future for gas engines for electric generation, though possibly limited to moderate size units.

TABLE VI. — **Gas-Power Plants from 1903 to 1910.**

Year	Number of undertakings		Capacity in kW.	
	in operation	in progress	in operation	in progress
1904	1	—	30	—
1907	2	—	105	—
1908	2	2	105	124
1909	3	9	379	635
1910	9	41	729	3,864

On the other hand, the oil engine has not yet found any extensive use in our central station industry, the only instance being a Diesel 50 HP. engine erected for the purpose of lighting a town in the Prefecture of Hyogo.

CHAPTER II.

Electric Traction. Early History.

The first experimental attempt to operate an electric car equipped with a Sprague motor was made in 1890 on the occasion of the industrial exhibition held at Tokyo.

It was not, however, until 1895 that a serious effort was made to employ it for public traffic.

The Kyoto Electric Railway Co. was the first to undertake that business. The Company ran six street-cars on a single track railroad extending originally over 9 miles of the city.

Digitized by Google

The car was of the single truck type and provided with two General Electric 25 HP. railway motors working on the overhead single trolley system in the usual way.

From that time on, the importance of the application of electricity for traction purpose was gradually recognised with the result that new entreprises of this character were, in succession, established at several places, though not at anything like the same rate of progress as was being made in the electric lighting industry during the same period.

The first interurban railway was made by the Daishi Electric Railway Company (afterwards amalgamated with the Keihin Electric Railway Company) operating five cars with a Walker 25 HP. motor on a single track about 1/4 mile long.

The following table has been prepared to show the prevailing practice in electric traction ten years ago.

Digitized by Google

TABLE VII. — **Electric Traction Undertakings.** — June 1900.

Name of Company	Paid up Capital in £	Date of opening Line	Gauge	Length of route in miles	Equival. length of single track in miles	Rail		Number of cars		Generator
						Type	Weight in lbs. yard	Passengers	Freight	
Kyoto El. Railway Co.	42,000	Jan. 1895	3′ 6″	10m 14ch	10m 14ch	T	45	31	4	General Electric 100 kW × 2 Walker 75 kW × 1
Nagoya „	30,000	May 1898	3′ 6″	1m 27ch	2m 54ch	T	50	16	—	Walker 100 kW × 2
Keihus „	24,925	Jan. 1899	4′ 8½″	1m 15ch	2m 40ch	T	61,5	5	3 (trailer)	75 kW × 1
Odawara „	70,000	Mar. 1900	4′ 6″	8m 0	9m 40ch	T	56	16 (trailer) 14 (motor)	6 (trailer) 1 (motor)	Walker 150 kW × 2
Toyodzu	15,000	May 1900	3′ 6″	7m 0	14m 0	T	40	16	5	110 kW × 1

Digitized by Google

Electric Traction.

System of distribution.

Originally a single trolley overhead wire fed direct from the central station, was exclusively employed.

Where, however, alternating current transmission began to be much used this led to the necessity of some transforming equipment for converting transmitted power to direct current, which was first put in practice on March 1900 by the Odawara Electric Railway Company.

The generating station, was about 6 miles away from the road, and consisted of two 150 kW. 3-phase alternators driven by 250 HP. Pelton wheels working under a head of 430 ft. of water.

Two rotary converters substations were installed along the railroad, where the 3500 volts transmitted alternating current was transformed to 550 volts direct current through the medium of 100 kW. rotaries with step down transformers.

Keeping in view the magnetic disturbance of electric current to the magnetic observations as well as its corrosive effect on subterranean metal structures, the single trolley system had to be abandoned in connection with the street railway and was replaced by the double trolley system without earth return.

The first installation under this new method was put down in August 1903 by the Tokyo Electric Railway Company.

The Company has three steam generating stations with an aggregate of 10,000 kW.

For the census year 1909 the state of its business was as follows: Capital £. 6,000,000; called up, £. 3,205,000; length of route, 553 miles.

The following figures give information shewing the increasing use of the double trolley in street railway work.

Digitized by Google

TABLE VIII. — **Overhead system.** — 1909.

		Length of route in miles	Equivalent length of single track in miles	Number of cars
Single trolley	Street . . .	28,6	45,2	214
	Interurban	118,6	165,0	330
Double trolley	Street . . .	79,3	145,5	1272
	Interurban	—	—	—

The following tramway statistics give information as to the progress made during the past fifteen years, as well as the present state of electric traction in so far as its principal items are concerned.

It will be noted that the census figures for 1910 show an enormous increase over any of the past years.

TABLE IX.

Electric Traction for the fifteen years ending 1910.

Year	Number of Undertakings	Equivalent length of single track, in miles	Number of cars	Total * Station capacity in kw.	Passengers per annum per mile
1895	1	9	25	200	—
1900	5	38,6	98	1,035	—
1903	10	63	344	5,353	—
1904	15	145	877	7,455	—
1905	17	203	1,145	12,592	—
1906	18	254	1,313	1,255	—
1907	18	291	1,456	1,255	250,000
1908	19	318	1,660	1,909	320,000
1909	23	351	1,806	2,327	370,000
1910	34	547	—	7,961	—

* Including motor and lighting load.

Digitized by Google

TABLE X. — **Electric Traction.** — 1910.

Number of undertakings . .	34	Passengers carried per mile per annum	370,000
Equivalent length of single track in miles	547	Passengers per car mile . .	5.8
Track length per undertaking in miles	16	Income per mile per annum in pounds.	£.2,820
Number cars per mile of track	5.2	Income per mile per day in pounds	£. 3.8
Station output per mile of track in kW.	66.3	Capital outlay per mile of track in pounds	£.7,600
kW. per car	13		

TABLE XI.

Electric Undertakings during the census years 1903 to 1909.

Number according to character of load.

Year	Number of Undertakings					
	Electric Supply	Electric Traction	Electric Supply and Traction	Isolated plants	Total	Percentage Increase
1903	81	6	4	365	456	1.00
1904	84	8	7	374	473	1.04
1905	87	9	8	407	511	1.12
1906	89	4	14	452	553	1.23
1907	98	4	14	486	602	1.32
1908	116	4	15	555	690	1.51
1909	131	7	16	615	769	1.69
1910*	187	28	17	647	879	1.74

* Including those in progress.

Digitized by Google

CHAPTER III.

Manufacturing Industry.

As our early makers of electric machines were occupied in reproductions of those by foreign designers, no notable advance was naturally to be expected at that period.

It, however, deserves special mention that even at such an early stage in the development of our manufacturing industry, the Ishikawajima Shipyard built with success in 1896 two 2000 volt 100 kW. single-phase alternators which were put into actual work at the Kakusa generating station of the Tokyo Electric Light Company.

On the other hand, the development, which has taken place during these few years, has been a fast growing one, so that at present almost every kind of electric machine, of moderate size, is manufactured in our country.

Noteworthy instances are found in the 1500 kW. 45,000 volt water-cooled transformers of the Yokohama Electric Supply Company and also the 750 kW. 3300 volt 3-phase alternators of the Nagoya Electric Light Company now in successful operation, both having been built at the Shibaura Engineering Works.

Electric lamps, wires, insulators, lamp fixtures etc. are now manufactured in very large quantities in our factories, the leading representatives of which are the Tokyo Electric Company, in lamps, the Yokohama Electric Wire Manufacturing Works, in wire, and the Shobu Porcelain Manufacturing Company, in insulators.

Some examples of materials made in the country, from recently prepared data, are as follows: 6600 volt 400,000 c. m. underground armoured cable supplied to the Tokyo Electric Lighting Co. by the Yokohama Electric Wire Mfg. Co.; 5,000 volt 2,500,000 c. m. insulated cable supplied to the Osaka Electric Light Co. by the same; 55,000 line insulators for the use in a new water power installation of the Tokyo Electric Lighting Co. by the Shobu Porcelain Mfg. Co.

Although home produced articles of small size, including pole-transformers, stationary motors of several horse power, porcelain

Digitized by Google

insulators, lamp fixtures etc. now command a sale far in excess of imported ones, we have still largely to rely upon foreign manufacturers for machines of large power, tramway motors, measuring instruments and various special kinds of electrical apparatus.

CHAPTER IV.

Future Prospects.

The statistical figures already given show very clear evidence of the extraordinary progress in our central station industry during the past few years. In fact, though the present state of its development is not still comparable with those in advanced foreign countries, it falls very little behind them, in so far as its rate of increase is concerned.

It must be also noted that, thanks to the greater facility for utilizing natural water power, resulting from the peculiar geographical features, water has contributed more than any other kind of power to the present prosperity of our electrical industry and it also promises a probable brilliant future.

TABLE XII. — **Kilowatt capacity including those in progress during the census years from 1903 to 1910.**

Year	Capacity in kW.	Rate of Increase %
1903	80,239	
1904	96,544	21
1905	122,276	27
1906	223,683	84
1907	299,698	34
1908	374,012	25
1909	439,877	18
1910	591,821	35

Digitized by Google

The above figures show a notable fact, that it has required only nine years for an enormous increase from 80,239 kW. in 1903 to 591,821 kW. (about 7,5 times) in 1910.

It may be said that there are two centres in our electric industrial development, one in Tokyo in the East, the other in Osaka in the West.

Electrical supply for lighting and power in Tokyo is drawn from a 27,800 kW. (18,000 kW. by water and 9,800 kW. by steam) system of the Tokyo Electric Light Co., while tramway service is operated by steam power plants of the Tokyo Railway Co. with a total capacity of 12,800 kW.

There are four hydraulic plants now in progress and another in contemplation, which together with the present capacity of 40,610 kW. will make an aggregate of about 260,200 kW.

Thus in the near future more than 260,000 kW. will be available for a general supply in Tokyo.

It deserves special mention that the system of the last mentioned power plant includes an 110,000 volt transmission of 73,730 kW. through more than 150 miles of transmission lines.

In view of this phenomenal development of the electrical industry in all directions, the Government has done everything in its power to protect and supervise the work.

In connection therewith the Electrical Measurements Law was first adopted in Dec. 1910 in regard to the certifying of electricity meters and in April of this year it was followed by another Law which involves a series of regulations dealing with the electric supply generally.

I would say in conclusion that in April 1910 the Government entered upon a new investigation of the hydraulic power available in our country and that up to the end of last year 1,340,000 HP. of water power had already been reported.

Digitized by Google

CHAPTER V.

GENERAL TABLE

TABLE XIII. — Supply of Lighting

in main populated cities & towns — 1891.

Place	Primary Power	Station output in kW.	Number of Lamps wired		Rate per month per 10 c. p.
			Incand.	Arc	
Tokyo . . .	Steam	964	14,671	108	—
Osaka . . .	„	370	6,529	75	—
Kobe	„	120	2,400	—	—
Kyoto . . .	„	100	1,344	13	—
Yokohama .	„	120	1,400	—	—

TABLE XIV. — Supply of Lighting

in main populated cities & towns — 1909.

Place	Primary Power	Station output in kW.	Number of Lamps wired	Equivalent kW. of Lamps	Population	Watt (c. p.) per inhabitant	Rate per month per 10 c. p.
Osaka . . .	Steam	13,600	276,000	9,668	1,217,000	7.95 (2.27)	£ 1.00
Kobe . . .	„	2,700	85,725	2,963	377,000	7.87 (2.25)	0.95
Fukuoka .	„	1,740	20,185	671	79,300	8.45 (2.41)	1.20
Tokyo . .	Water	15,000	450,000	15,800	2,168,000	7.30 (2.09)	1.20
Yokohama	„	7,350	80,787	3,297	393,000	8.40 (2.40)	1.20
Nagano . .	„	670	17,150	604	38,500	15.80 (4.50)	0.35
Sendai . .	„	700	38,100	538	91,000	5.90	0.60

Digitized by Google

TABLE XV.

Electric Undertakings during the census years 1903 to 1909.

Kilowatt capacity, character of load & method of driving.

Year	Primary Power	Capacity in kW.					
		Electric Supply	Electric Traction	Electric Supply & Traction	Isolated plants	Total	% increase
1903	Water	8,822	—	620	3,682	13,124	1 —
	Steam	14,768	5,253	457	10,650	31,128	
	Total	23,590	5,253	1,077	14,332	44,252	
1904	Water	10,452	—	895	5,062	16,409	1.31
	Steam	20,219	7,455	1,267	13,622	42,563	
	Total	30,671	7,455	2,162	18,684	58,972	
1905	Water	11,073	—	890	6,584	18,547	1.68
	Steam	23,482	12,592	3,937	15,816	55,827	
	Total	34,555	12,592	4,827	22,400	74,374	
1906	Steam	12,960	—	965	11,270	25,195	2.05
	Water	25,837	1,255	17,727	21,282	66,101	
	Total	38,797	1,255	18,692	32,552	91,296	
1907	Steam	23,416	—	2,275	12,931	38,622	2.64
	Water	30,438	1,255	18,187	28,479	78,359	
	Total	53,854	1,255	20,462	41,410	116,981	
1908	Steam	42,412	—	3,215	17,319	62,946	3.56
	Water	35,386	1,905	21,240	36,270	94,801	
	Total	77,798	1,905	24,455	53,589	157,747	
1909	Steam	54,034	282	3,988	18,348	76,652	4.34
	Water	39,813	2,045	22,990	50,414	115,262	
	Total	93,847	2,327	26,978	68,762	191,914	
1910*	Steam	201,367	1,742	6,188	45,140	254,437	5.48
	Water	62,059	16,210	43,600	63,571	185,440	
	Total	263,426	17,952	49,788	108,711	439,877	

* Including those in progress.

Digitized by Google

TABLE XVI. — **Lamps & stationery Motors connected** during the census years 1903 to 1909.

Year	Lamps									Stationary Motors				
	Number of Undertakings	Total				per Undertaking				Number of Undertakings	Total		per Undertaking	
		Actual Number	Equival. Number of 10 c. p.	Equival. kW.	Equivalent c. p.	Actual Number	Equival. Number of 10 c. p.	Equival. kW.	Equival. c. p.		Number of Motors	HP	Number of Motors	HP
1903	82	365,090	457,361	16,008	4,574,000	4,452	5,578	195	55,800	?	563	4,107	?	?
1904	89	423,120	489,088	17,118	4,862,000	4,754	5,495	195	54,700	?	634	5,404	?	?
1905	92	510,341	570,131	19,955	5,701,000	5,547	6,197	217	62,000	?	966	5,446	?	?
1906	97	651,284	726,632	25,432	7,266,000	6,714	7,491	252	74,900	?	1,484	8,278	?	?
1907	106	859,143	950,453	33,265	9,504,000	8,105	8,966	314	89,700	60	2,335	11,249	39	187
1908	127	1,230,876	1,302,153	46,265	13,218,000	9,692	10,253	364	104,100	83	3,978	17,093	48	206
1909	140	1,611,604	1,665,509	59,551	17,586,000	11,511	11,897	425	125,600	97	5,820	23,111	60	238

TABLE XVII. — **Capital, Debenture & Loan** during the census years 1903 to 1909.

Year	Number of Undertakings	Total				per Undertaking			
		Capital	Paid up capital	Debenture & Loan	Reserve Fund	Capital	Paid up capital	Debenture & Loan	Reserve Fund
1903	89	£ 28,495,407	£ 24,101,894	£ 1,806,679	£1,435,429	£ 320,060	£ 270,808	£ 20,300	£ 16,129
1904	98	54,487,309	35,405,006	1,054,167	1,738,952	555,993	361,276	10,757	17,744
1905	102	60,444,358	43,793,077	2,516,700	2,075,486	592,592	429,343	24,674	20,348
1906	105	115,188,887	63,386,268	2,636,115	2,265,298	1,097,037	603,679	25,106	21,574
1907	109	138,082,877	87,675,443	5,681,713	4,080,518	1,266,815	804,362	52,126	37,436
1908	139	181,577,665	126,120,802	15,411,228	6,713,275	1,306,314	907,344	110,872	48,297
1909	150	198,236,313	143,701,982	7,362,763	8,154,715	1,321,576	958,013	49,085	54,365

Digitized by Google

TABLE XVIII. — Electric Lines during the census years 1903 to 1909.

Equivalent Length of single wire:
Character of load & wether transmission or distribution.

Year	Character of Load	Total length of Route in miles	Equivalent length of single wire, in miles				Per cent increase
			up to 500 (d. c.) 800 (a. c.)	up to 8,500	above 8,500	Total	
1903	Elect. S.	1,555.0	2,470.8	2,927.7	198.1	5,596.6	1 —
	Elect. T.	51.8	138.7	—	9.6	148.3	
	Elect. S. & T.	49.0	118.5	118.3	—	236.8	
	Total	1,655.8	2,728.0	3,046.0	207.7	5,981.7	
1904	Elect. S.	1,752.7	2,782.7	3,365.3	277.7	6,425.7	1.18
	Elect. T.	105.3	360.1	6.6	15.3	382.0	
	Elect. S. & T.	84.7	170.5	119.6	—	290.1	
	Total	1,942.7	3,313.3	3,491.5	293.0	7,097.8	
1905	Elect. S.	1,977.0	3,016.9	3,775.5	371.9	7,164.3	1.36
	Elect. T.	172.6	575.1	70.6	15.3	661.0	
	Elect. S. & T.	52.7	223.2	112.3	—	335.5	
	Total	2,242.3	3,815.2	3,958.4	387.2	8,160.8	
1906	Elect. S.	2,113.2	3,148.4	4,315.2	466.6	7,930.2	1.50
	Elect. T.	119.2	526.3	89.5	15.3	631.1	
	Elect. S. & T.	128.7	315.7	132.7	—	448.4	
	Total	2,361.1	3,990.4	4,537.4	481.9	9,009.7	
1907	Elect. S.	2,557.3	3,752.4	5,160.9	986.3	9,899.6	1.88
	Elect. T.	80.9	215.2	—	—	215.2	
	Elect. S. & T.	315.5	818.1	352.0	15.3	1,185.4	
	Total	2,953.7	4,785.7	5,512.9	1,001.6	11,300.2	
1908	Elect. S.	3,306.3	4,287.5	6,840.6	1,685.9	12,814.0	2.53
	Elect. T.	37.6	142.6	—	—	142.6	
	Elect. S. & T.	509.2	1,188.9	746.8	229.3	2,165.0	
	Total	3,853.1	5,619.0	7,587.4	1,915.2	15,121.6	
1909	Elect. S.	3,796.1	5,073.9	8,194.8	2,340.7	15,609.4	3.11
	Elect. T.	64.9	191.3	—	—	191.3	
	Elect. S. & T.	648.9	1,408.3	1,070.6	312.2	2,791.1	
	Total	4,509.9	6,673.5	9,265.4	2,652.9	18,591.8	

Elect. S. = Electric supply.
Elect. T. = Electric traction.
Elect. S. & T. = Electric supply & traction.

Digitized by Google

TABLE XIX. — Electric Lamps wired — 1909.

Character of Load	Number of Consumers	Total Number of Lamps			Equival. kW. of lamps wired	Average Number per consumer		Watt per 1,000 inhabitants
		Glow lamps		Arc lamps		Actual	Equivalent of 10 c. p.	
		Actual	Equivalent of 10 c. p.					
Electricity Supply	410,760	1,500,406	1,550,152	2,022	55,545	3.7	3.8	4.9
Electric Supply & Traction . .	35,697	111,198	115,357	46	4,005	3.1	3.2	1.3
Total	446,457	1,611,604	1,665,509	2,068	59,550	3.6	3.7	4.1

TABLE XX. — Stationary Motors — 1909.

Character of Load	Stationary Motors				All other electric service		
	Number of Consumers	Number of Motors	Equivalent kW.	HP per 1,000 inhabitants	Number of Consumers	Number connected	Equivalent kW.
Electricity Supply	5,094	5,548	16,211	1,758	515	286	8,908
Electric Supply & Traction . . .	254	272	1,030	411	4	4	958
Total	5,348	5,820	17,241	1,470	219	290	9,866

Digitized by Google

TABLE XXI. — **Capital, Debenture & Loan,** character of load — 1909.

Character of Load	Number of Undertakings	Capital	Paid up Capital	Fixed Capital	Legal Fund	Special Fund	Debenture	Loan	Rate of total reserve fund on paid up capital %
Electricity Supply . . .	122	£104,748,309	£ 79,185,890	£ 64,544,385	£4,072,818	£1,916,111	£7,546,250	£10,560,510	7.5
Electric Traction . . .	5	9,130,000	6,136,000	6,175,204	161,941	35,950	—	471,081	3.2
„ Supply & Traction	16	84,357,944	59,380,092	52,806,959	128,488	849,407	463,800	2,936,450	3.3
Total	143	198,236,313	144,701,982	123,526,548	1,044,654	2,801,468	8,010,050	13,968,041	5.7

TABLE XXII. — **Income & Expenditure** — 1909.

Character of Load	Number of Undertakings	Gross Income					Expenditure			Profit	Reserve Fund		Dividend	
		Lighting	Power	Traction	Other sources	Total	Electric service	Other sources	Total		Legal & special	rate on profit	Amounts	Annual rate
		£	£	£	£	£	£	£	£	£	£		£	
Electricity Supply	129	13,077,820	1,784,624	—	9,783,645	23,646,089	7,453,038	7,407,852	14,860,890	8,785,199	801,315	9.1 %	6,816,469	10 %
Electric Traction	5	—	—	1,132,804	64,567	1,197,371	631,601	—	631,601	565,770	37,568	6.6	493,868	6
Electric Supply & Traction . . .	16	691,175	155,129	8,776,226	1,059,466	10,681,996	6,032,008	73,815	6,105,823	4,576,173	499,748	10.9 9.6	3,701,675	7.8 9.6
Total	150	12,768,995	1,939,753	9,909,030	10,907,678	35,525,456	14,116,647	7,481,667	21,598,314	13,927,142	1,338,631		11,012,012	

Digitized by Google

RÉSUMÉ

L'auteur présente dans sa communication un tableau complet du développement des industries électriques au Japon et montre comment ces industries, qui, il y a 20 ans, ne figuraient que par un nombre très limité d'installations pour l'éclairage montant à quelques centaines de chevaux, ont aujourd'hui atteint le chiffre de 439.000 Kw. de puissance installée.

Le plus grand développement s'est produit naturellement dans les dernières années, et s'est trouvé principalement dû à l'utilisation des nombreuses et puissantes chûtes d'eau, dont le pays est pourvu, et qui sont évaluées à 1.340.000 chevaux. C'est ainsi que l'augmentation de la puissance installée qui était du 25 % en 1908, a pu atteindre le 35 % en 1910.

Le Japon possède aussi 547 Km. de voie simple de tramways urbains et vicinaux, et quelques industries électrochimiques absorbant à peu près 7000 Kw.

L'industrie des manufactures électriques est aussi en cours de développement: à présent déjà les moteurs et les dynamos de puissance modérée, ainsi que des transformateurs jusqu'à 1500 Kw., peuvent être construits dans le pays.

Il y a même des fabriques de câbles et d'isolateurs, de manière que l'importation de matériel électrique devient chaque jour moins importante.

Les tableaux statistiques intercalés dans le texte sont des plus intéressants.

Digitized by Google

Réglage des Groupes électrogènes.

J. L. Routin (Lyon)

GÉNÉRALITÉS

Réglage mécanique et Réglage électrique.

Dans le cas le plus répandu où il s'agit de Groupes fournissant des courants alternatifs alimentant une distribution en dérivation, le réglage doit porter à la fois sur la vitesse et sur la tension. On retrouve d'ailleurs dans tous les cas, quelle que soit la nature du courant et le mode de distribution, l'obligation d'opérer un réglage mécanique pour faire varier le couple moteur suivant la charge, et un réglage électrique pour maintenir la constance de la tension ou de l'intensité. Nous verrons cependant que, dans le cas particulier du courant continu, on peut combiner les deux réglages en un seul.

On dispose, pour opérer le réglage d'un groupe, de deux moyens distincts, qui sont: la variation du degré d'admission du fluide moteur et la variation du champ magnétique.

Il était assez naturel que le premier moyen, d'ordre purement mécanique, retînt l'attention des mécaniciens et que le second, d'ordre électrique, fût employé par les électriciens. On a ainsi été conduit à distinguer le réglage électrique du réglage mécanique.

Digitized by Google

Nous conserverons cette distinction en raison de la commodité qu'elle présente pour l'étude des phénomènes, mais il est indispensable de ne pas perdre de vue qu'il ne s'agit en réalité que de deux faces différentes d'un même problème, et non pas de deux problèmes différents.

Réactions mutuelles entre le réglage mécanique et le réglage électrique. — Si l'on suppose que l'on envisage le cas d'un générateur à tension constante, on reconnaît de suite que, pour une excitation donnée, la tension à charge constante est proportionnelle à la vitesse ; d'autre part, pour une position déterminée de l'organe qui règle l'admission du fluide moteur, la vitesse à charge constante est fonction de l'excitation. Le réglage de la vitesse et le réglage de la tension sont donc étroitement liés l'un à l'autre, et c'est bien à tort qu'on a trop longtemps négligé leurs réactions mutuelles.

Ces réactions peuvent avoir dans certains cas particuliers des effets assez imprévus. Nous nous bornerons à signaler à titre d'exemple le cas suivant, qui est remarquable par sa simplicité et par la conclusion très nette à laquelle il conduit. Supposons qu'un groupe soit composé d'une machine à vapeur conduisant une dynamo à courant continu ; supposons que la charge de la dynamo soit constituée par un rhéostat de résistance constante, et que l'admission de la vapeur soit elle-même constante. Supposons enfin que la tension soit maintenue rigoureusement constante par un regulateur parfait. Cherchons à représenter sur un graphique (v. fig. 1) les couples moteur M et résistant R en fonction de la vitesse (ω), en portant les vitesses suivant $O\omega$ et les couples suivant OC. L'admission étant supposée constante, les couples moteurs peuvent être eux-mêmes considérés comme constants, et seront en conséquence représentés par une horizontale (M).

D'autre part, la tension du générateur étant maintenue constante, le travail T qu'elle produira sur une résistance fixe sera lui-même constant. Le couple résistant R étant lié à la vitesse (ω) par l'équation $R\omega = T$, sera donc représenté par une hyperbole équilatère R. L'intersection de M et de R fait connaître la vitesse de régime (Ω) que tendrait à prendre le groupe dans les conditions ci-dessus définies ; mais il est facile de voir que cet équilibre serait instable : on constate en effet, en se reportant au graphique, que toute augmentation de vitesse produirait une accélération positive et inversement.

Digitized by Google

On peut donc en conclure que lorsqu'un groupe, comportant une machine à vapeur, travaille à admission constante sur un rhéostat fixe, la seule adjonction d'un régulateur de tension " théoriquement parfait „ suffirait à détruire la stabilité de l'équilibre qui doit exister à l'état de régime entre le couple moteur et le couple résistant.

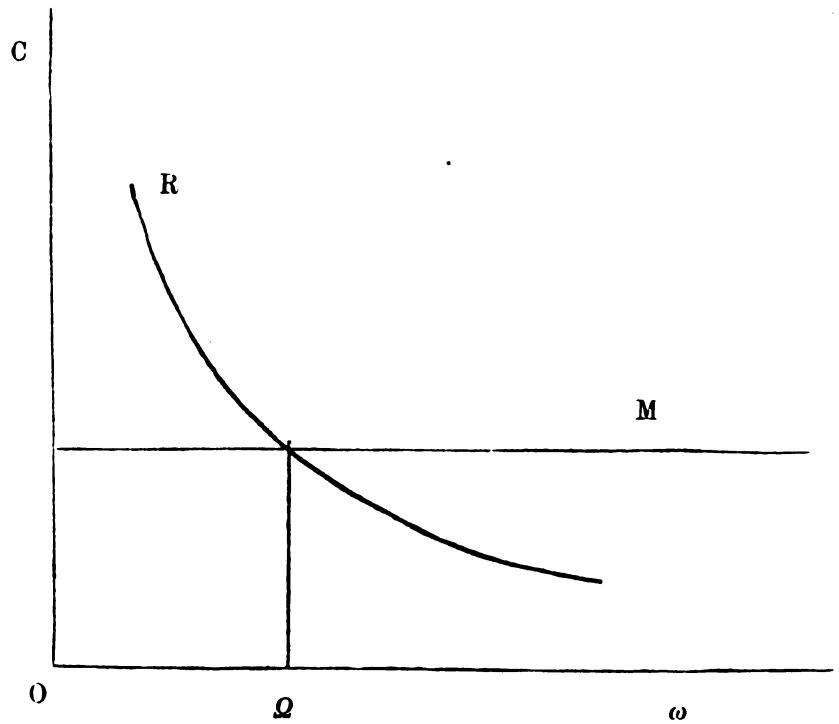


Fig. 1.

On peut en conclure également que dans le cas pratique, où la machine à vapeur est pourvue d'un régulateur de vitesse, l'adjonction d'un régulateur de tension a pour effet de mettre à contribution le régulateur de vitesse alors même que la charge resterait constante. Ces considérations permettent d'expliquer les difficultés qu'on rencontre fréquemment dans l'application des régulateurs, et elles expliquent pourquoi le réglage automatique de la tension ne se rencontre encore qu'à titre exceptionnel dans les centrales. Il n'est pas sans intérêt, d'ailleurs, de faire remarquer qu'un régulateur de tension théoriquement parfait introduirait dans la stabilité de l'équilibre des couples

Digitized by Google

des perturbations plus grandes qu'un régulateur ayant une certaine zone d'inaction.

Réglage Électro-Mécanique.

Dans le cas particulier du courant continu, comme le jeu du collecteur fait disparaître, pour le réseau d'utilisation, l'influence de la fréquence sous laquelle le courant est engendré dans l'induit, on n'a plus à s'occuper que de la tension ; on pourrait donc sans inconvénient tolérer des variations de vitesse assez importantes, et réaliser un réglage très satisfaisant en commandant l'admission du fluide moteur à l'aide d'un tensimètre Il convient de remarquer que dans ce cas (contrairement à ce que l'on obtient fatalement dans le cas du réglage tachymétrique) la vitesse du groupe sera forcément plus grande à vide qu'en charge. Ce mode de réglage est appliqué dans la plupart des usines qui distribuent l'énergie sous intensité constante.

Réglage Mécanique.

Le Réglage mécanique a toujours pour objet de maintenir, autant que cela est possible, la constance de la vitesse.

Réglage dynamométrique. — Pour maintenir la constance de la vitesse, la première idée qui se présente tout naturellement à l'esprit consiste à disposer un appareil capable de mesurer le couple résistant, et d'agir sur les organes de réglage de façon à modifier le couple moteur et à le maintenir constamment égal au couple résistant.

C'est sur ce principe qu'était basé le Régulateur dynamométrique imaginé en 1829 par Poncelet. Ce genre d'appareil n'a cependant jamais reçu d'applications pratiques ; il y a de cela deux raisons : la première est d'ordre pratique, et tient aux difficultés que présente la construction des dynamomètres de transmission, surtout lorsqu'il s'agit de transmettre de grandes puissances ; la seconde est d'ordre théorique, et tient à ce que les régulateurs dynamométriques sont incapables de réagir contre les variations de pression du fluide moteur. Pour bien mettre en lumière ce dernier point, prenons un exemple, et supposons que le dyna-

Digitized by Google

momètre soit constitué, comme celui de Poncelet, par un ensemble de deux plateaux reliés entre eux par un accouplement élastique, le premier étant solidaire de l'arbre moteur et le second solidaire de l'arbre résistant. Toute augmentation du couple résistant provoque un déplacement angulaire relatif des deux plateaux, et ce déplacement est utilisé pour commander l'augmentation de l'ouverture d'admission du fluide moteur. On voit de suite que toute augmentation de pression du fluide moteur produit, à charge constante, un déplacement angulaire relatif de même sens que dans le cas précédent; l'augmentation de pression du fluide moteur provoquerait donc l'augmentation d'ouverture d'admission, et la stabilité de régime serait forcément détruite.

Poncelet avait d'ailleurs lui-même fait remarquer que son régulateur ne peut pas être employé lorsqu'on a à craindre des variations dans la pression du fluide moteur.

On peut encore faire remarquer que, pour appliquer pratiquement ce mode de réglage, il faudrait déterminer au préalable dans chaque cas particulier la loi de variation de la puissance fournie en fonction du déplacement de l'organe qui agit sur l'admission du fluide moteur: cette loi est en général assez compliquée, et l'on serait dans l'obligation de commander le déplacement de l'organe qui agit sur l'admission du fluide moteur par une came dont le tracé varierait pour chaque application. On aurait enfin à tenir compte de l'usure des organes, qui peut diminuer considérablement la puissance fournie pour une ouverture déterminée de la vanne (notamment dans le cas des turbines hydrauliques). L'ensemble de ces considérations suffit à condamner le réglage dynamométrique.

Réglage par modérateur tachymétrique. — Le principe de tous les régulateurs tachymétriques consiste à admettre qu'on peut tolérer une certaine variation de vitesse, et à utiliser cette variation elle-même pour commander les organes de réglage. Ces régulateurs ne sont donc en réalité que des modérateurs. Le nombre d'appareils imaginés dans ce but est considérable; ils dérivent d'ailleurs presque tous du proto-type imaginé par Watt. Les modérateurs de ce genre se composent d'un système déformable de tiges articulées, et portant des masses auxquelles on communique un mouvement de rotation dont la vitesse est proportionnelle à celle de la machine à régler.

Digitized by Google

La force centrifuge qui agit sur les masses et qui tend à déformer le système est équilibrée par des ressorts ou par des poids. Dans un tel système la déformation est fonction de la vitesse de rotation.

On conçoit dès lors que, si l'on utilise cette déformation pour agir sur l'admission du fluide moteur, de façon qu'une augmentation de vitesse provoque la fermeture, on ne saurait jamais dépasser la vitesse qui correspond à la fermeture complète. Lorsque la machine tourne à vide, la vitesse sera voisine de cette vitesse limite.

Lorsque la charge augmente, la vitesse décroît, le modérateur fait augmenter l'admission, et l'équilibre pour le nouveau régime se produit forcément à une vitesse inférieure. La vitesse sera donc nécessairement plus grande à vide qu'en pleine charge.

Demander qu'elle reste la même reviendrait à rechercher l'équilibre indifférent du système régulateur pour une vitesse déterminée, mais alors, pour toute vitesse différente, l'équilibre serait instable, et la déformation passerait à la limite dans un sens ou dans l'autre. Or, pour entrer en action, le système régulateur doit vaincre les résistances des frottements, ce qui exige forcément une variation de vitesse que l'inertie maintiendra inévitablement pendant un certain temps; le régulateur n'agirait donc plus que pour produire intempestivement l'ouverture ou la fermeture complète.

Ces considérations générales s'appliquent à tous les modérateurs tachymétriques.

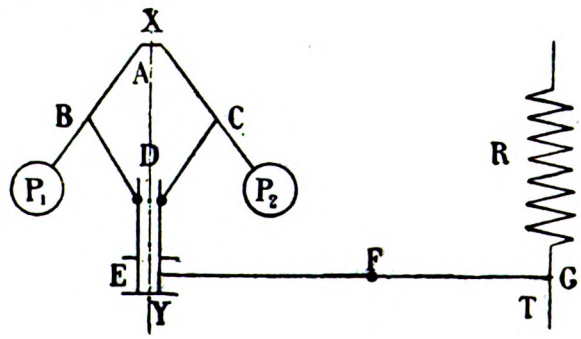


Fig. 2.

Pour les faire mieux comprendre, je les reprendrai pour un cas particulier en les traduisant sous forme graphique.

Digitized by Google

Supposons qu'il s'agisse d'un régulateur à action directe, représenté schématiquement (fig. 2) par un parallélogramme articulé ABCD; deux masses pesantes P_1, P_2, et un manchon E tournant autour de l'axe XY. Le déplacement du manchon E entraîne la rotation du levier EG (terminé en E par une fourchette qui s'appuie sur les joues du manchon E) autour du centre F.

L'effort antagoniste est produit par un ressort R. Au levier E G est attachée, en G, la tige T qui commande l'admission. — D'après la disposition du croquis, un déplacement de haut en bas de la tige T, correspondant à une augmentation de la vitesse, doit faire diminuer l'admission. Le levier E G est constamment soumis à deux efforts agissant en sens inverses. Représentons sur un graphique (fig. 3) les moments de ces deux forces par rapport au point F, en portant verticalement les positions du point G, et horizontalement les valeurs correspondantes des moments.

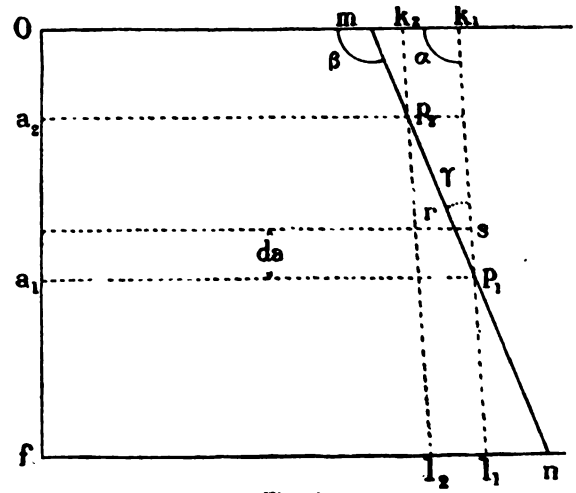


Fig. 3.

Désignons par O et *f* les deux positions du point G, correspondant respectivement à l'ouverture et à la fermeture complète. Le moment de la force antagoniste produite par le ressort R sera représenté par une ligne droite (*m n*); le moment des forces centrifuges du système en rotation sera, pour une vitesse de régime donnée (ω), représenté par une ligne ($k_1 l_1$) que nous supposerons réduite à une droite; ces deux lignes se

Digitized by Google

coupent en un point (p_1) dont la projection (a_1) sur l'axe vertical définit un certain degré d'admission fa_1 qui correspond à une charge déterminée de la machine.

Si le couple résistant vient à augmenter, la vitesse tend à diminuer, et la ligne $k_1 l_1$ vient progressivement jusqu'en k_2, l_2, définissant par son intersection avec (m n) le nouveau degré d'ouverture fa_2 de l'admission, nécessaire pour le rétablissement de l'équilibre entre le couple moteur et le couple résistant.

On voit que, à chaque degré d'ouverture, correspond une vitesse de régime donnant l'équilibre des efforts centrifuge et antagoniste, ce qui revient à dire que le rôle du modérateur consiste à assigner pour chaque valeur de la charge une valeur correspondante de la vitesse.

La vitesse de régime est, ainsi que nous l'avons déjà dit, forcément plus grande à vide qu'en charge. Ceci exige évidemment que l'angle d'inclinaison (α) des directions (k l) soit plus petit que l'angle d'inclinaison (β) de la direction (m n).

Si, pour un régime de charge bien défini, on cherche à déranger brusquement le régulateur de sa position d'équilibre en imprimant au levier E G un petit déplacement (d a), on éprouve une résistance proportionnelle à (r s), et par suite d'autant plus grande que l'angle $\gamma = \beta - \alpha$ est lui-même plus grand; cet angle peut donc servir à définir la stabilité du régulateur.

En cherchant à augmenter la stabilité, on augmente forcément l'écart entre la vitesse à vide et la vitesse en charge.

L'isochronisme ne pourrait être obtenu qu'à la condition d'identifier (m n) avec l'une des courbes telles que

$$k_1 l_1 , \; k_2 l_2 ..... \; k_n l_n.$$

Cette solution ne présente d'ailleurs, ainsi que nous l'avons vu, qu'un intérêt purement théorique, car le régulateur se trouvant pour une vitesse déterminée en équilibre indifférent, est fatalement affolé par l'effet de l'inertie des pièces en mouvement.

Action indirecte. — Lorsqu'il s'agit de régulariser le mouvement des machines à vapeur, on peut atteler directement la tige T à la commande de l'admission. Mais, lorsqu'on a à régler des turbines, l'effort à développer sur les vannages est souvent considérable; on est alors obligé de faire du réglage indirect,

Digitized by Google

en interposant un moteur auxiliaire que le levier EG commande par l'intermédiaire de relais. Il est facile de démontrer que, si l'on n'employait aucun artifice spécial, le réglage indirect conduirait aux mêmes difficultés que la recherche de l'isochronisme. En effet, l'action du moteur auxiliaire, pour pouvoir parer aux brusques et importantes variations de la charge, doit être aussi rapide que possible. L'ouverture ou la fermeture complète doivent être obtenues en un temps (t_1) qui varie en pratique de 2 à 5 secondes. Il en résulte que, si une variation de vitesse se trouvait, par suite des effets d'inertie, maintenue pendant un temps supérieur à (t_1), le moteur produirait intempestivement l'ouverture ou la fermeture complète.

Asservissement. — Pour retrouver la stabilité dans le cas d'une action indirecte, il est indispensable de faire agir le déplacement de la vanne sur le régulateur, de façon que la vitesse de régime soit variable avec la charge.

Cette réaction du déplacement de la vanne sur le Régulateur a reçu le nom d'asservissement. On se trouve alors ramené au cas de l'action directe.

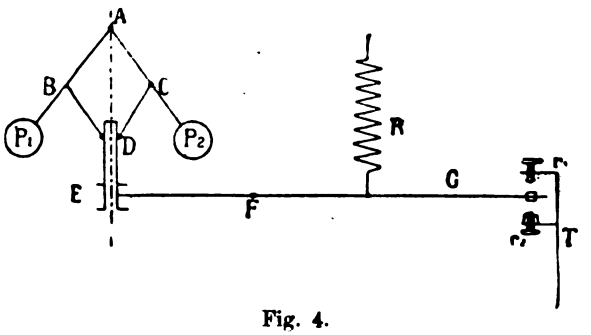


Fig. 4.

Le moyen le plus simple pour obtenir l'asservissement consiste à disposer les relais (r_1), (r_2) à l'extrémité d'une tige T (fig. 4) reliée au vannage, de façon à suivre immédiatement tous ses déplacements [(r_1) provoquant l'ouverture et (r_2) la fermeture]. Si le déplacement du vannage était assez rapide pour que la tige T suivît sans aucun retard tous les déplacements du point G, tout se passerait évidemment comme dans le cas de l'action directe. Mais, en général, il n'en est pas ainsi; le réglage s'opère alors suivant une loi complexe, et il est indispensable d'a-

Digitized by Google

voir recours à l'ingénieuse représentation graphique imaginée par M. Léauté (que nous étudierons plus loin) pour analyser le phénomène.

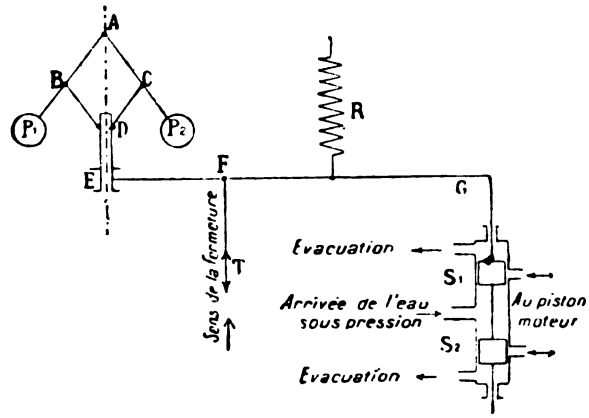


Fig. 5.

Lorsqu'on emploie un piston hydraulique pour déplacer la vanne, il est préférable de laisser fixes les soupapes équilibrées S_1 S_2 (fig. 5) qui provoquent le déplacement du piston moteur,

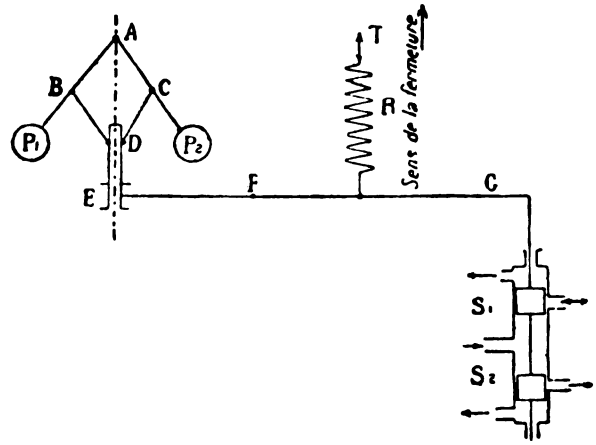


Fig. 6.

et qui jouent le rôle des relais (r_1) (r_2). L'asservissement s'obtient alors en faisant déplacer le point (f), autour duquel oscille le levier du modérateur, par la tige T reliée au vannage; on pourrait également faire agir la tige T sur le ressort R (voir fig. 6).

Digitized by Google

Compensation. — En déplaçant à la main l'extrémité précedemment supposée fixe du ressort antagoniste R (voir figure 4), on peut modifier à volonté la vitesse de régime correspondant à une position déterminée de la vanne. En se reportant à la représentation graphique des moments des efforts centrifuges et antagonistes, on voit, en effet, que, si l'on augmente la tension du ressort, ce déplacement se traduit par une translation de $(m\,n)$ — par exemple de $m\,n$ en $m'\,n'$ (fig. 7) — (ces deux lignes étant parallèles), et que pour une même ouverture fa_1 le moment des efforts centrifuges passe de $a_1\,p_1$ à $a_1\,p_2$, ce qui implique une augmentation correspondante de la vitesse à charge constante.

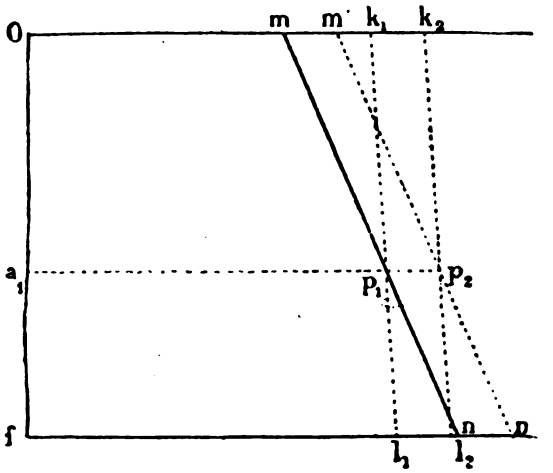


Fig. 7.

Au lieu d'agir sur le ressort R, on pourrait évidemment obtenir le même résultat en chargeant le levier du régulateur à l'aide d'un poids.

On pourrait également agir en faisant varier la longueur de la tige T. En supposant qu'on raccourcisse la tige, cette action se traduirait (fig. 8) par un déplacement simultané de f en f' pour l'horizontale qui correspond à la fermeture complète, et de o en o' pour celle qui correspond à l'ouverture complète; si l'on suppose que l'admission reste constante, a_1 vient en a_1', on a du reste $a_1\,a_1' = o\,o' = f\,f'$; $k_1\,l_1$ vient en $k_2\,l_2$, et l'on voit que, pour une même admission, la vitesse de régime à charge constante est devenue plus grande.

Digitized by Google

On peut, en particulier, en agissant par l'un de ces moyens, ramener constamment la vitesse à sa même valeur après chaque action du modérateur. Cette action peut être produite, soit à la main, soit par un dispositif automatique; on lui a donné le nom de " compensation „.

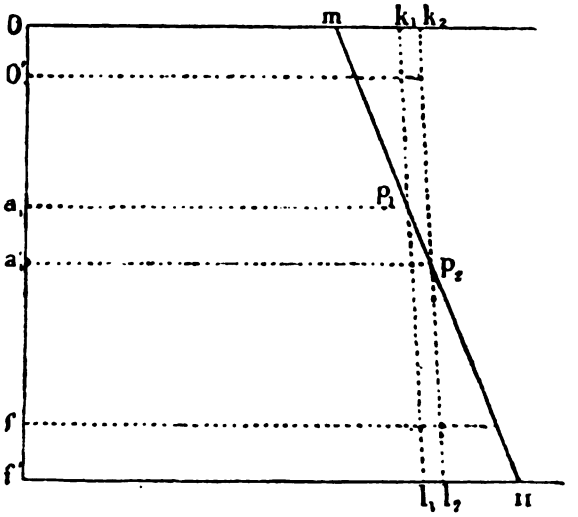


Fig. 8.

Les compensateurs sont donc des correcteurs de l'action des modérateurs. Pour conserver la stabilité, il est indispensable que l'action du compensateur ne dépende pas uniquement de la position du manchon E; dans les compensateurs tachymétriques, on fait généralement intervenir le temps comme seconde variable; on est ainsi conduit à tolérer des écarts momentanés dans la vitesse.

On peut également faire intervenir comme seconde variable la charge du groupe mesurée à l'aide d'un wattmètre. La compensation se produit alors brusquement, et peut même être obtenue, si l'inertie du groupe est suffisante, avant la mise en action du régulateur. Nous dirons qu'on fait dans ce cas de la " procompensation „.

Effets de l'inertie.

Inertie propre du modérateur. — L'inertie propre du modérateur est toujours nuisible; elle tend en effet, à chaque variation

Digitized by Google

de la charge, à faire entraîner l'organe qui règle l'admission au delà de la position convenable. — Cet effet est d'autant plus marqué que l'inertie du groupe est plus faible, car pour une même variation de charge les variations de vitesse sont alors plus rapides. Il est particulièrement à redouter avec les gros modérateurs à action directe. Il est beaucoup moins sensible dans le cas du réglage indirect; mais il est évidemment impossible de le rendre complètement négligeable, tant qu'on emploie pour commander le réglage un tachymètre à boules.

On peut cependant arriver à ce résultat en employant l'artifice suivant: on fait commander par le moteur qui entraîne le groupe une petite magnéto, et l'on se procure ainsi une tension proportionnelle à la vitesse qu'on utilise pour actionner un tensimètre asservi, disposé de façon à agir sur l'organe qui commande l'admission du fluide moteur. Comme on peut construire le tensimètre de façon que son moment d'inertie soit pratiquement négligeable, la difficulté se trouve tournée.

L'effet nuisible de l'inertie propre du modérateur peut encore être combattu par l'emploi d'amortisseurs (dash-pot à air ou à huile); mais on risque alors de rendre l'appareil paresseux, et de laisser apparaître, en cas de variations brusques de la charge, des variations momentanées de vitesse trop importantes.

Inertie du groupe. — L'inertie du groupe est toujours favorable en ce qu'elle s'oppose aux variations brusques de la vitesse, et donne au modérateur le temps d'intervenir sans à coup. Il en serait évidemment de même dans le cas du réglage indirect si la vitesse de manœuvre était assez grande et la mise en action du moteur auxiliaire instantanée. — Par contre, dans le cas du réglage indirect sans asservissement, l'inertie du groupe peut intervenir dans un sens défavorable, et provoquer l'apparition d'oscillations à longues périodes.

Remarque. — Lorsque le réseau alimente des moteurs assujétis à avoir une vitesse proportionnelle à celle du groupe générateur, il convient de prendre en considération l'inertie de ces moteurs, qui joue évidemment un rôle analogue à celle du groupe.

Digitized by Google

Étude graphique du réglage de la vitesse.

Lignes de régimes. — Dans son remarquable mémoire sur les oscillations à longue période et les moyens propres à les éviter, M. Léauté (1) fait intervenir la considération des abaques qui représentent, pour une charge donnée, la vitesse de régime en fonction des degrés d'admission. M. Léauté a donné à ces abaques le nom de lignes de régime.

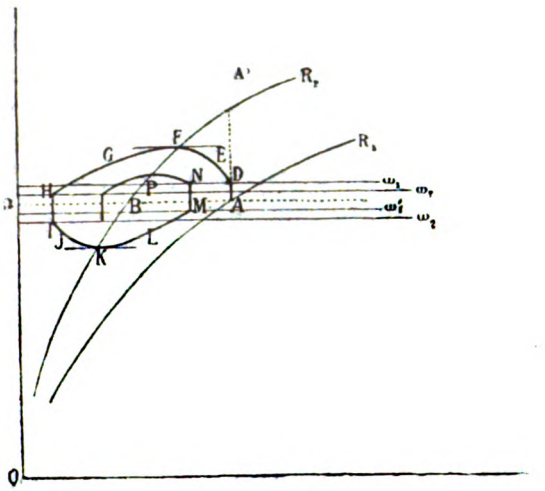


Fig. 9.

Propriétés des lignes de régime. — Supposons que la charge reste constante et qu'on fasse varier brusquement l'admission; en raison de l'inertie, la vitesse ne prendra pas immédiatement la valeur correspondant à la nouvelle admission. — L'état du groupe peut à chaque instant être défini graphiquement sur un abaque, tel que celui de la figure 9, par la position d'un point figuratif qui fait connaître la vitesse (ω) et le degré d'admission (e).

Si ce point est situé au-dessous de la ligne de régime, la vitesse tendra à augmenter; inversement la vitesse tendra à diminuer si le point est situé au-dessus.

Chaque ligne de régime peut donc être considérée comme la délimitation d'une zone supérieure, dans laquelle l'accélération

(1) Voir " Journal de l'École Polytechnique ", 55ème cahier.

Digitized by Google

est toujours négative, et d'une zone inférieure, dans laquelle l'accélération est toujours positive.

Cycles de Léauté. — Supposons que l'on passe brusquement d'une charge c_1 à une charge c_2. Considérons les deux lignes de régime correspondantes R_1 et R_2 (fig. 9). A l'origine de la perturbation, le point figuratif de l'état du groupe est en A, intersection de la ligne de régime R_1 avec l'horizontale correspondant à la vitesse normale Ω.

S'il n'y avait pas de régulateur, l'organe de réglage resterait immobile, le point figuratif se déplacerait sur la verticale passant par le point A jusqu'à la rencontre A′ de cette verticale avec la ligne de régime R_2; mais, si l'on suppose que le groupe est muni d'un régulateur, le point figuratif A doit tendre théoriquement vers le point B, intersection de R_2 avec l'horizontale qui correspond à la vitesse normale. Nous supposerons la vitesse de manœuvre constante et le régulateur non asservi, et nous suivrons, avec M. Léauté, les " cycles „ successifs que doit, en général, décrire le point figuratif avant le rétablissement de l'équilibre.

Il faut tout d'abord remarquer que, dans le cas d'un régulateur à force centrifuge, le déplacement du manchon E ne peut se produire que si la variation de vitesse est suffisante pour vaincre les frottements; pour chaque position du manchon E, il faut donc considérer la vitesse limite pour laquelle ce manchon est sur le point de monter et celle pour laquelle il est sur le point de descendre.

Désignons par:

ω_1 la vitesse qui provoque l'embrayage de fermeture;
ω_2 la vitesse qui provoque le débrayage de fermeture;
ω_1' la vitesse qui provoque le débrayage d'ouverture;
ω_2' la vitesse qui provoque l'embrayage d'ouverture.

On voit (fig. 9) que, lorsque la charge passe brusquement de la valeur R_1 à la valeur R_2, A s'élèvera d'abord verticalement jusqu'à sa rencontre en D avec l'horizontale correspondant à la vitesse qui provoque l'embrayage de fermeture, puis l'organe de réglage étant mis en mouvement, et la vitesse continuant à croître, le point figuratif décrira un arc de courbe tel que DE, qui rencontre R_2 en F; en ce point la tangente à l'arc DEF est évidemment horizontale, car le couple moteur étant alors égal au couple résistant, l'accélération est nulle.

Digitized by Google

L'organe de réglage continuant à agir dans le sens de la fermeture et l'accélération étant devenue négative, le point figuratif décrit l'arc FG, qui coupe en H l'horizontale correspondant à ω_2. Nous désignerons, avec M. Léauté, les courbes, telles que DEFGH, sous le nom de courbes de fermeture.

Tant que la vitesse reste comprise entre ω_2 et ω_2', le régulateur reste inactif et l'organe de réglage immobile; on retrouve donc un nouveau déplacement vertical du point figuratif, qui sera lui-même suivi d'une courbe d'ouverture IJKLM analogue à la courbe de fermeture DEFGH précédemment envisagée. Le point figuratif aura ainsi parcouru un " cycle „ complet lorsqu'il sera revenu en N sur l'horizontale ω_1 qui coupe R_2 en P. Si l'on a NP $<$ DP, le point figuratif s'est rapproché de la position vers laquelle il doit tendre. Il y a alors " effet utile „ suivant l'expression de M. Léauté.

Pour que le réglage soit terminé, il faut et il suffit que le point figuratif rencontre R_2 dans la zone comprise entre ω_1' et ω_1.

Un cycle est toujours parcouru dans le même sens, quelle que soit la nature de la perturbation.

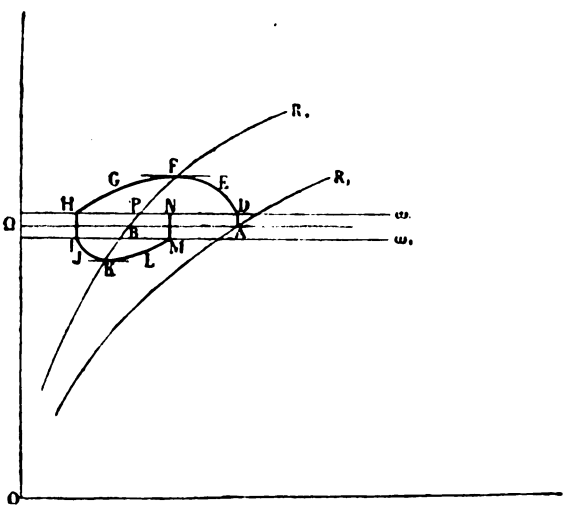


Fig. 10.

Dans le cas où les frottements qui s'opposent aux déplacements du régulateur sont négligeables, on a: $\omega_1 = \omega_2$ et $\omega_1' = \omega_2'$. Si l'on compare la figure 10 qui se rapporte à ce cas à la fig. 9,

Digitized by Google

on voit que la suppression des frottements augmente toujours l'effet utile de chaque cycle.

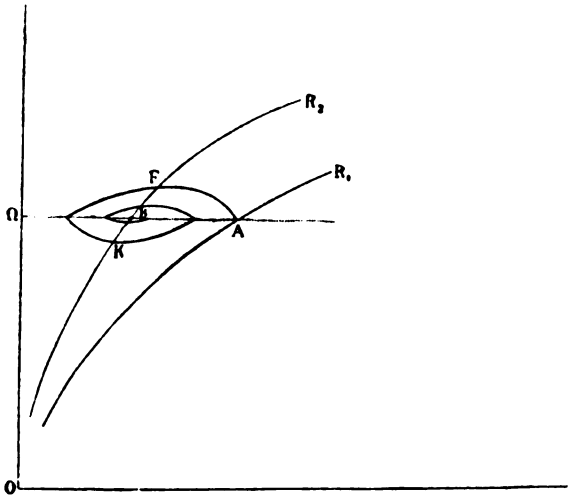


Fig. 11.

Si le régulateur ne tolérait aucune zone d'inaction, on aurait $\omega_1 = \omega_1'$, et les cycles seraient réduits aux courbes d'ouverture

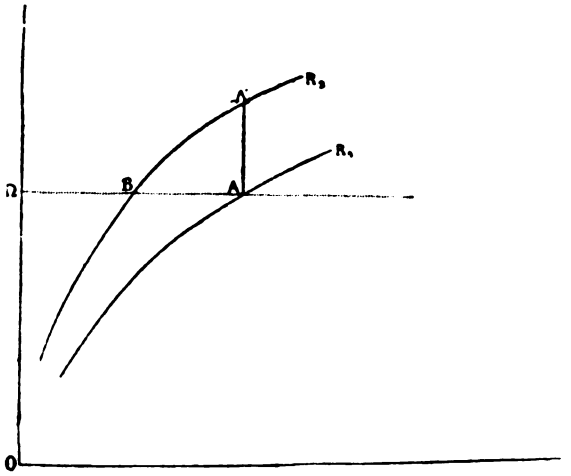


Fig. 12.

et de fermeture (voir fig. 11); l'équilibre ne pourrait alors être rétabli qu'après un nombre infini d'oscillations.

La considération des cycles permet de se rendre compte *grosso*

Digitized by Google

modo de l'influence de l'inertie du groupe et de la vitesse de manœuvre de l'organe qui règle l'admission du fluide moteur.

Si l'inertie est très petite, et la vitesse de manœuvre très réduite, le cycle (fig. 12) tend à se réduire à la verticale AA′ et à la portion A′B de la nouvelle ligne de régime ; le réglage s'opérerait alors sans oscillation ; mais la vitesse ne pourrait être ramenée à sa valeur normale, qu'après avoir subi un écart momentané très voisin de AA′.

Si l'on suppose, au contraire, l'inertie, ainsi que la vitesse de manœuvre, très grandes, le cycle tend à se réduire au rectangle *a*, *b*, *c*, *d* (fig. 13), formé par les deux horizontales ω_1 et ω_2' et les deux verticales correspondant à l'ouverture et à la fermeture complète.

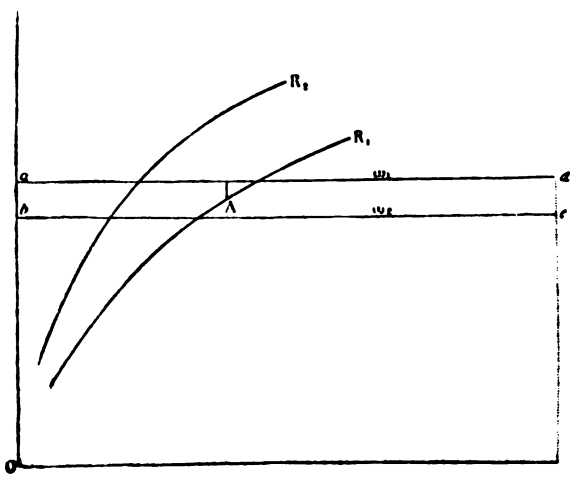


Fig. 13.

La variation de vitesse serait alors réduite à $\omega_1 - \omega_2$; mais le nombre d'oscillations serait infini, et l'action du régulateur se bornerait à faire passer brusquement l'organe de réglage de la position correspondant à la pleine ouverture à la fermeture complète et inversement.

Cas d'un modérateur asservi et compensé. — La considération des cycles permet encore de se rendre compte des effets de l'asservissement et de la compensation.

Digitized by Google

Asservissement. — Lorsque le régulateur est asservi, la vitesse de régime est forcément plus petite en charge qu'à vide, et les vitesses correspondant aux embrayages et aux débrayages sont elles-mêmes d'autant plus petites que l'admission est plus grande ; les lignes $\alpha_1\ \beta_1$ et $\alpha_1'\ \beta_1'$, représentatives de ces vitesses, sont donc alors, non plus horizontales (tracé pointillé), mais inclinées (tracé plein), comme l'indique la figure 14 (qui suppose les frottements nuls).

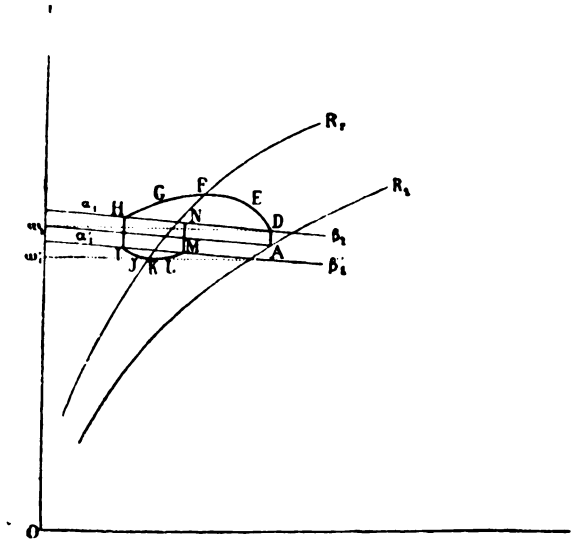


Fig. 14.

En comparant avec la figure 10 on voit que, toutes choses égales d'ailleurs, l'effet utile de chaque cycle se trouve très sensiblement augmenté, et que, par suite, pour un même écart dans la vitesse, le nombre d'oscillations sera moindre.

Dans le cas où l'inertie et la vitesse de manœuvre sont très grandes, le cycle, pour un régulateur asservi, se réduit à la ligne brisée A *a b c d e f g* (fig. 15) limitée par les lignes $\alpha_1\ \beta_1$ et $\alpha_2\ \beta_2$ qui correspondent à l'embrayage et au débrayage de fermeture.

Compensation. — Supposons que, la charge restant constante et égale à (R_1), on agisse brusquement sur l'organe de compensation de façon que les vitesses d'embrayage et de débrayage.

Digitized by Google

qui étaient tout d'abord $\omega_1\ \omega_2$, $\omega_1'\ \omega_2'$, deviennent égales respectivement à $\omega_3\ \omega_4$, $\omega_3'\ \omega_4'$.

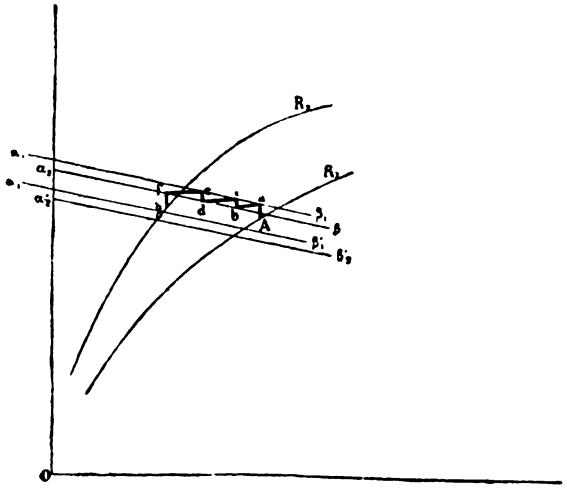


Fig. 15.

La figure 16 montre comment se déplacera le point figuratif A pour atteindre la nouvelle vitesse de régime imposée par la manœuvre du compensateur.

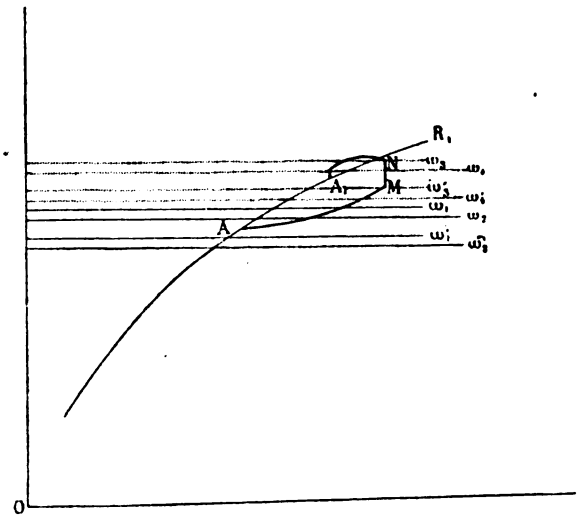


Fig. 16.

Digitized by Google

La figure 17 montre enfin qu'on peut théoriquement obtenir un réglage à vitesse constante et sans oscillations en combinant la pro-compensation avec l'asservissement.

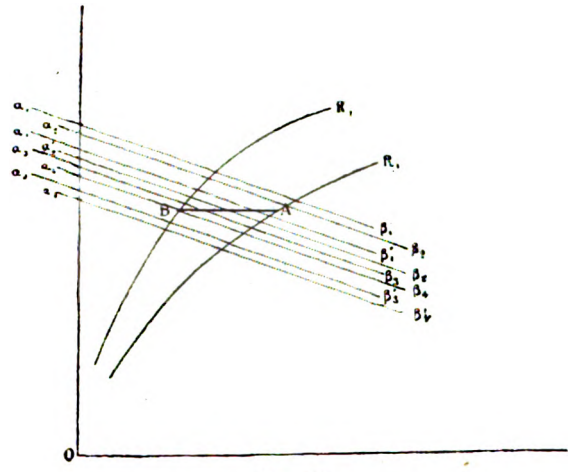


Fig. 17.

$\alpha_1\ \beta_1$, $\alpha_2\ \beta_2$, $\alpha_1'\ \beta_1'$, $\alpha_2'\ \beta_2'$, sont les lignes figuratives des vitesses d'embrayage et de débrayage avant la compensation.

$\alpha_3\ \beta_3$, $\alpha_4\ \beta_4$, $\alpha_3'\ \beta_3'$, $\alpha_4'\ \beta_4'$, sont les mêmes lignes après la manœuvre du pro-compensateur.

On voit immédiatement qu'il suffit, pour obtenir le résultat annoncé, d'avoir une inertie et une vitesse de manœuvre suffisamment grande.

Réglage électrique.

Le réglage électrique a généralement pour objet de maintenir, autant que cela est possible, la constance de la tension; mais il peut également avoir pour objet de maintenir la constance de l'intensité. Les deux problèmes offrant entre eux de grandes analogies, nous nous bornerons à étudier le premier. Nous donnerons d'ailleurs plus loin la description d'un régulateur, qui peut être employé indifféremment dans les deux cas.

Réglage de la tension. — La tension doit être maintenue constante aux centres de consommation. Comme les pertes en ligne

Digitized by Google

ne sont jamais négligeables, le problème du réglage électrique consiste donc à obtenir aux bornes des générateurs une tension qui aille en croissant avec la charge. Il faut de plus que cet accroissement soit proportionnel au courant total débité par l'ensemble des générateurs qui alimentent un même feeder.

Si l'on suppose, comme on l'a fait généralement jusqu'à présent, que la vitesse reste constante, la seule variable qu'on ait à envisager est la charge.

Il était donc tout naturel qu'on cherchât tout d'abord à faire quelque chose d'analogue au réglage dynamométrique, et à utiliser les variations de l'intensité pour réagir sur la tension.

Compoundage électrique. — Dans le cas particulier du courant continu, cette solution conduit à un dispositif très simple, connu depuis longtemps sous le nom de compoundage, et qui consiste, comme on le sait, à superposer sur les noyaux inducteurs deux bobinages distincts, parcourus respectivement par un courant dérivé et par le courant principal.

Dans les alternateurs compounds, de production récente, les dispositifs employés sont plus complexes: on s'est trouvé dans l'obligation d'avoir recours à des excitatrices et à des transformateurs spéciaux, qui ne font plus, à proprement parler, partie intégrante du système inducteur, lequel ne porte plus qu'un seul bobinage.

Bien que très séduisant, en théorie, le compoundage direct est loin de donner, en pratique, une solution parfaite du problème du réglage de la tension.

J'énumérerai rapidement les principaux inconvénients qu'il présente:

1) Il ne tient aucun compte des variations de tension dues à des variations momentanées ou permanentes de la vitesse.

2) Il ne tient aucun compte des variations de tension dues aux variations de température du bobinage shunt. Or, si l'on admet une variation de 45 degrés entre la température des inducteurs en service et leur température au repos (qui est la température ambiante), on constate que cette seule cause produit une variation de plus de 20 % dans la résistance du circuit dérivé.

3) Il ne tient aucun compte des variations de tension dues à l'hystérésis.

Digitized by Google

4) Dans le cas des courants alternatifs, il ne tient que très imparfaitement compte des variations du facteur de puissance.

5) Il ne permet de régler avec précision la tension que pour une seule valeur de la charge: pour toutes les autres valeurs la théorie indique et la pratique prouve qu'il ne constitue qu'une solution approchée.

6) Il ne permet pas de faire varier le degré d'hypercompoundage: or c'est là une condition qui s'impose pour tous les groupes destinés à fonctionner en parallèle.

Les pertes en ligne sont en effet proportionnelles au courant total fourni par l'ensemble des générateurs; pour un courant donné, fourni par l'ensemble des générateurs accouplés, l'augmentation de la tension aux bornes doit donc être proportionnelle au nombre de générateurs en service.

Il convient cependant de signaler que, malgré leurs imperfections, les générateurs compounds restent très précieux lorsqu'on fait du réglage électro-mécanique.

Réglage par modérateur tensimétrique. — Les modérateurs tensimétriques fournissent une solution beaucoup plus parfaite que le compoundage direct, car ils tiennent compte de toutes les causes qui peuvent avoir une répercussion sur la tension.

Ils sont basés sur le même principe que les modérateurs tachymétriques: on admet qu'on peut tolérer une certaine variation de la tension, et on utilise cette variation elle-même pour commander le rhéostat de réglage de l'excitation. Les modérateurs tensimétriques sont généralement à action indirecte; ils se composent en principe d'un voltmètre, d'un système de relais et d'un moteur qui commande le rhéostat.

Dans le cas particulier du courant continu, comme il est loisible de faire varier la vitesse, on peut supprimer le rhéostat, et commander directement l'organe qui règle l'admission du fluide moteur par le modérateur tensimétrique. On règle alors à vitesse croissant avec la charge.

Tout ce que nous avons dit à propos des modérateurs tachymétriques est applicable aux modérateurs tensimétriques.

On démontrerait ainsi:

Que pour un modérateur non compensé, la tension en charge est forcément plus faible que la tension à vide;

Que dans le cas d'une commande indirecte, il est indispen-

Digitized by Google

sable de prévoir un asservissement faisant réagir le déplacement de la touche du rhéostat sur le tensimètre;

Qu'on peut faire varier à volonté le taux du réglage pour une charge donnée en adjoignant un dispositif permettant de faire de la " compensation „.

Nous avons vu que les besoins de la pratique exigent que le modérateur tensimétrique assure aux bornes des générateurs une tension croissant avec la charge.

Il s'ensuit que les régulateurs non compensés sont sans emploi pratique, et qu'il faut prévoir une hypercompensation si l'on veut pouvoir assurer le service sans le secours de fils pilotes.

Cet effet s'obtient avec la plus grande facilité: dans le cas du courant continu, il suffira de disposer un bobinage parcouru par le courant principal, et opposant son action à celle de la bobine fixe du tensimètre. Dans le cas du courant alternatif, on emploiera un transformateur de compoundage pour introduire dans le circuit du tensimètre une tension proportionnelle à la perte en ligne.

La compensation électrique qu'on obtient ainsi dans les modérateurs tensimétriques présente le caractère particulier d'intervenir instantanément au moment même où se produit la variation de la charge, et avant que le réglage se soit effectué; elle se différencie ainsi nettement de l'action des premiers compensateurs mécaniques, qui agissent lentement et à postériori.

Bien que ces deux actions découlent de la même théorie, il est donc préférable, pour éviter toute confusion, de les désigner par des termes distincts.

En réalité la compensation électrique d'un modérateur tensimétrique est un compoundage indirect; comme on utilise un effet mécanique qui est la manœuvre du rhéostat, j'ai proposé, il y a quelques années déjà, l'expression de " compoundage électro-mécanique „, qui est à présent couramment employée.

Applications.

Les appareils qui sont appliqués dans les Centrales électriques, pour réaliser le réglage indirect, se présentent parfois sous des apparences assez compliquées. Mais en se reportant à ce que nous avons dit sur l'asservissement et la compensation, il sera toujours facile de comprendre le rôle dévolu à chaque organe.

Digitized by Google

Les moteurs qui sont employés dans le réglage indirect peuvent être mécaniques, hydrauliques ou électriques. Nous donnerons à titre d'exemple trois descriptions correspondant à chacun de ces trois cas. Il n'existe d'ailleurs que fort peu de différence entre les modèles adoptés par les différents constructeurs.

Modérateur tachymétrique et servo-moteur mécanique. — La figure 18 donne le schéma complet du modérateur tachymétrique à servo-moteur mécanique, construit par les usines Neyret-Brenier et C.ie de Grenoble (Isère). — La figure 19 représente les détails du servomoteur proprement dit.

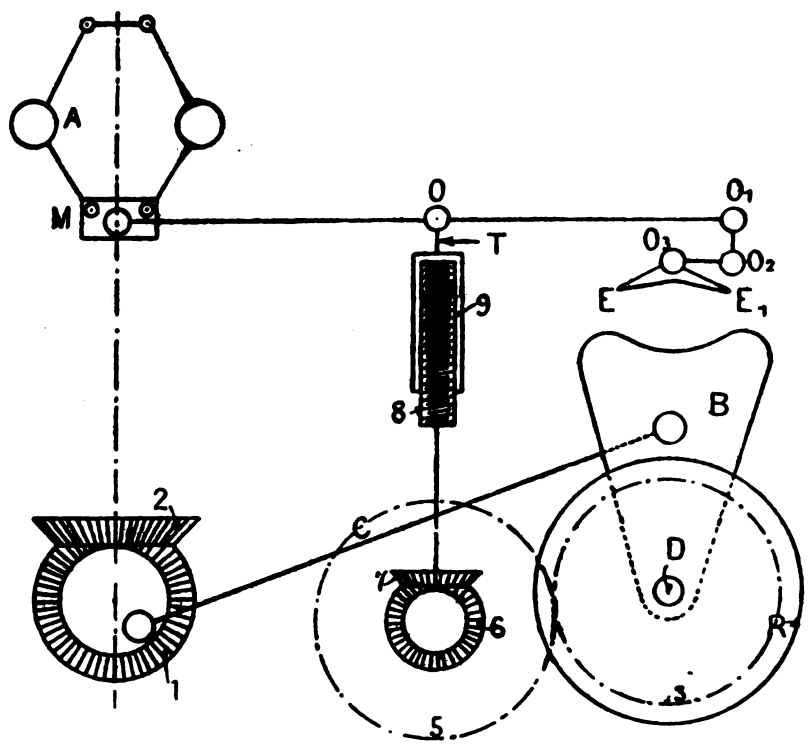


Fig. 18.

La turbine commande le tachymètre *A* (fig. 18) par l'intermédiaire de poulies et des pignons 1 et 2. Le pignon 1 communique à la pièce *B*, grâce à la bielle *C*, un mouvement oscillant autour de l'arbre *D* de commande du vannage.

Digitized by Google

Sur la pièce B (fig. 19) sont montés 2 chiens m, m_1 et 2 cliquets n, n_1 qui ont, en temps ordinaire, les positions indiquées sur la figure; la pièce B peut alors osciller librement sans que les cliquets entrent en prise avec la roue R clavetée sur l'arbre D.

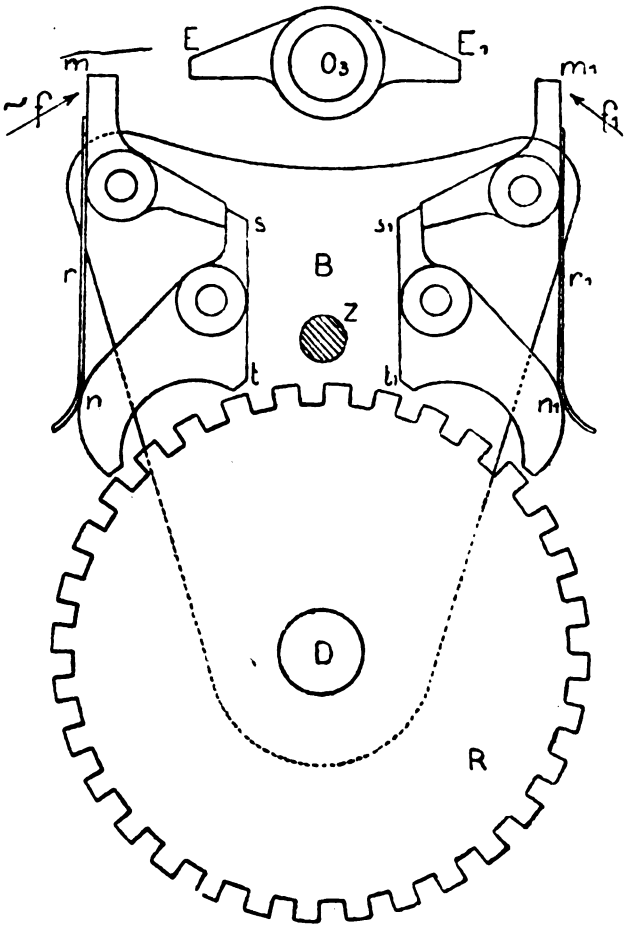


Fig. 19.

D'autre part, les mouvements du manchon M du tachymètre sont transmis par le levier MO_1, oscillant autour de O, par la tige O_1O_2 à une ancre EE_1 oscillant autour de l'axe fixe O_3.

L'asservissement est produit de la manière suivante: l'axe O du levier MO_1 reçoit les déplacements de la tige T proportionnels aux déplacements du vannage par la rotation de la roue R, les engrenages 3, 5, les pignons 6, 7, la vis 8 et l'écrou 9,

Digitized by Google

car 3 est claveté comme R sur l'arbre D, 6 fait corps avec 5, et 9 ne peut pas tourner.

Lorsque la vitesse de la machine augmente, M s'élève et E_1 s'abaisse. Pendant un instant, à la fin de la course de B dans le sens f_1 et au commencement de sa course suivant f, le chien m_1 est en contact avec E_1 et dégage la queue S_1 du cliquet n_1; celui-ci, sollicité par r_1, s'abaisse et, pendant la course suivante, f entraîne R dans le sens de la fermeture du vannage et relève le point O.

Lorsque E_1 sera revenu à sa position normale, c'est-à-dire lorsque O aura été relevé (ou lorsque le vannage aura été déplacé) proportionnellement au manchon M, le chien n_1 qui est relevé à chaque oscillation par le choc de t_1 contre le taquet fixe Z s'arc-boutera à nouveau sur m_1 et n'entrera plus en prise avec R; le déplacement du vannage sera alors terminé.

Dans le cas d'une diminution de vitesse, les choses se passeraient d'une façon analogue pour provoquer l'ouverture du vannage.

On voit que la vanne de la turbine se déplace, en fin de compte, proportionnellement aux déplacements de M; en d'autres termes la vanne reproduit tous les déplacements du manchon du tachymètre.

Les engrenages 3 et 5 sont calculés de telle sorte que:

1° Lorsque le manchon M est en haut de sa course et le vannage complètement fermé, l'axe O occupe une position haute telle que l'ancre EE_1 laisse librement passer les chiens m et m_1;

2° Lorsque le manchon M est au bas de sa course et le vannage complètement ouvert, l'axe O occupe une position basse telle qu'il en soit de même.

Ceci est nécessaire pour que le servo-moteur à cliquets ne cherche pas à déplacer le vannage lorsqu'il est bloqué.

On peut agir à la main sur le vannage en faisant tourner l'arbre D; mais alors il faut avoir soin d'arrêter l'ancre EE_1 au moyen d'un écrou *ad hoc* (non représenté sur le schéma); bien qu'on déplace alors en même temps l'axe O, on ne risque pas de mettre les cliquets en prise avec la roue R.

Remarque. — Le servo-moteur mécanique ne peut transmettre que des efforts relativement peu considérables. Il n'est donc applicable que lorsque les vannages sont légers (cas des hautes chutes) ou faciles à équilibrer.

Digitized by Google

Il est à action forcément très lente, car, à chaque embrayage, le déplacement de la vanne ne doit pas depasser 1/100e de sa course totale.

En supposant qu'on puisse produire 5 embrayages par seconde (ce qui est un maximum) il faudrait encore 20 secondes pour obtenir l'ouverture ou la fermeture totale.

Avec les servo-moteurs mécaniques le temps employé pour effectuer un réglage est proportionnel à la variation qu'il s'agit de corriger.

Modérateur tachymétrique à servo-moteur hydraulique. — La figure 20 donne le schéma complet du modérateur à servo-moteur hydraulique construit par les ateliers Neyret-Brenier et C.ie de Grenoble.

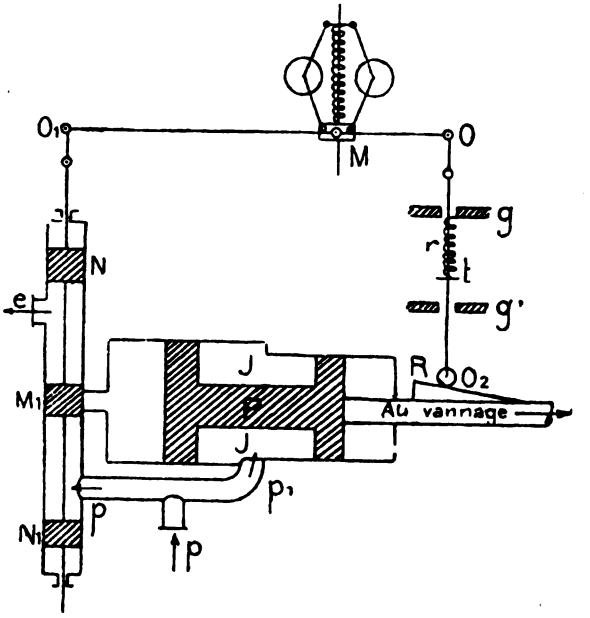


Fig. 20.

Un piston différentiel P peut se déplacer dans un cylindre, et sa tige commande le vannage de la turbine.

La cavité annulaire JJ est en communication constante par la tubulure p_1 avec l'eau sous pression, ou mieux l'huile.

L'eau sous pression est fournie soit par la chute elle-même,

Digitized by Google

si elle est assez élevée, soit par un accumulateur; la cavité J peut être mise en communication soit avec l'eau sous pression par la tubulure p, soit avec l'échappement par la tubulure e, suivant la position du piston soupape M_1; les pistons N et N_1 reliés à M_1 ont pour but de soustraire tout l'ensemble NM_1 et N_1 à l'action des pressions; cet ensemble forme une soupape équilibrée.

Cette soupape est commandée par le levier d'un tachymètre. L'asservissement est produit de la manière suivante: L'axe d'oscillation O du levier du tachymètre est porté par une tige verticale, constamment sollicitée vers le bas par un ressort r, prenant appui sur un guidage fixe g, d'une part, et sur une traverse t fixée à la tige, d'autre part. — OO_2 prend appui, par l'intermédiaire du galet O_2, sur une rampe R portée par la tige du piston P.

Dans le cas de la figure 20, la turbine est supposée tourner à sa vitesse normale; la soupape M_1 interrompt toute communication entre la cavité J et les tubulures p ou e, et le piston P ainsi que le vannage sont immobiles.

Supposons que la vitesse de la turbine augmente; le manchon M du tachymètre s'élève, et son mouvement est transmis à la soupape M_1 par le levier OMO_1 qui pivote autour de l'axe O; l'eau sous pression est admise en J, et le piston différentiel se déplace de gauche à droite pour fermer le vannage de la turbine. Pendant ce mouvement le galet O_2 monte sur la rampe R, le point O s'élève d'autant, et le levier OMO_1 tournant autour de l'axe porté par M, fait redescendre la soupape M_1; lorsque le piston P sera déplacé d'une quantité proportionnelle au chemin qu'avait parcouru le manchon M, la soupape M_1 sera revenue à sa position primitive, et le mouvement du piston P et aussi celui du vannage sera terminé.

Les choses se passeraient d'une façon analogue pour une diminution de la vitesse de la turbine.

Remarque. — Le servo-moteur hydraulique est plus puissant que le servo-moteur mécanique. En donnant au gros piston un diamètre de 40 centimètres, et au cylindre une longueur de $1^m,50$ environ (ce qui correspond à un déplacement utile de $0^m,50$), on peut obtenir, avec une pression de 1 Kg. par cm^2, un effort de 10.000 Kg. et un travail de 5000 kilogrammètres.

En employant un accumulateur on peut obtenir, avec le servo-moteur hydraulique, une action très rapide.

Digitized by Google

L'emploi du servo-moteur hydraulique présente cependant quelques inconvénients.

La soupape est un organe délicat; il suffit d'un grain de sable pour troubler et voir même pour arrêter son fonctionnement. Aussi emploie-t-on généralement, non pas de l'eau mais de l'huile sous pression, même lorsqu'on a affaire à de hautes chûtes. Il faut donc prévoir, comme organes accessoires, des pompes et des accumulateurs.

Pour parer au danger d'une rupture dans la canalisation d'huile sous pression, on dispose généralement autant de pompes et d'accumulateurs qu'il y a de groupes électrogènes. Ces organes accessoires deviennent alors encombrants et coûteux. Il faut compter qu'un régulateur hydraulique complet coûte environ 10.000 francs. C'est parfois plus que le prix de la turbine.

Il faut enfin noter que ces appareils exigent une surveillance constante et un entretien minutieux.

Régulateur électrique & servo-moteur électrique; asservissement magnétique et compensation instantanée.

La figure 21 donne le schéma complet du Régulateur électrique construit par la Société Industrielle des Téléphones, supposé appliqué au réglage de la tension.

(1) est un fléau de balance mobile autour de l'axe (2);

(3) est une bobine mobile suspendue au fléau, et sur laquelle le champ magnétique créé par les bobines (4) et (5) développe un effort vertical dirigé de haut en bas.

Les bobines (3), (4) et (5) sont reliées en série avec une résistance additionnelle (6), et ce circuit est connecté aux bornes du générateur dont il s'agit de régler la tension.

On a figuré sur le schéma les tôles qui forment le circuit magnétique.

Un contre-poids réglable (7) fixé au fléau, permet d'équilibrer l'effort développé sur (3). On peut d'ailleurs modifier à volonté la valeur de la tension normale sans avoir à toucher au contrepoids, en agissant sur un écrou (8) qui bande plus ou moins un petit ressort (9) fixé au fléau.

L'appareil de mesure est robuste et puissant; le couple qui sollicite la bobine mobile correspond en effet normalement à un effort de 250 gr. agissant sur un bras de levier de 12 centi-

Digitized by Google

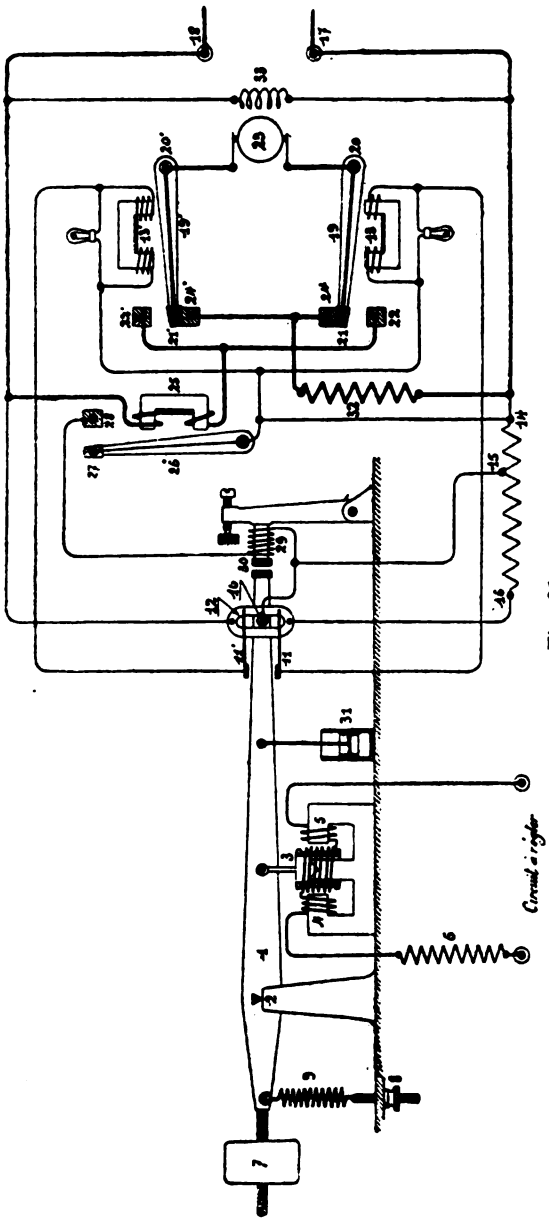


Fig. 21.

Digitized by Google

mètres; on rend ainsi négligeable l'effet des frottements, et l'on peut obtenir facilement une très grande sensibilité.

(10) est une tige de fer argenté fixée au fléau, et électriquement isolée de ce dernier.

Lorsque le fléau s'incline, la tige (10) peut venir en contact avec l'un ou l'autre des fils d'acier argentés (11) ou (11′) qui sont fixés au bâti par des supports isolants.

La tige (10) peut se déplacer librement dans l'évidement de la bobine fixe (12) qui la maintient constamment aimantée en vue d'assurer, ainsi qu'il sera expliqué plus loin, la fermeture franche et la rupture brusque des contacts.

Lorsque la tension est trop forte, le couple développé sur (3) l'emporte sur le couple antagoniste fourni par (7) et (9), le fléau s'incline et le contact s'établit entre (10) et (11).

Le circuit de l'électro (13) est alors parcouru par un courant dérivé entre les points (14) et (15) d'une résistance (14), (15), (16) utilisée comme potentiomètre, et reliée en (17) et (18) à une source de courant continu.

L'électro (13) attire son armature (19) qui, pivotant autour de (20), vient appliquer le contact en charbon, mobile, (21) contre le contact en charbon, fixe, (22); l'induit (23) du moteur qui commande le rhéostat (moteur à excitation constante) est alors mis en rotation dans le sens qui entraîne la diminution de l'excitation. Dès que le contact est rompu entre (10) et (11), l'armature (19) est rappelée par un ressort (non figuré au schéma) qui vient appliquer (21) contre (24); les balais de l'induit se trouvent ainsi mis en court circuit, ce qui provoque l'arrêt brusque du moteur par freinage électro-magnétique.

Lorsque la tension est trop faible, le fonctionnement de l'appareil s'explique d'une manière analogue; les organes qui entrent en jeu sont alors ceux qui sont désignés au schéma par des chiffres pourvus d'indices (19′), etc..... Il suffit de remarquer que le contact entre (21′) et (22′) aura pour effet de faire tourner l'induit dans le sens qui entraîne l'augmentation de l'excitation.

Pour limiter le courant de démarrage, on intercale une résistance fixe dans le circuit de l'induit. Des butées d'arrêt, non figurées au schéma, servent à limiter la course du fléau.

Digitized by Google

Asservissement magnétique et Compensation.

Chaque fois que le courant est lancé dans le moteur, l'électro (25), qui est parcouru par le courant de l'induit, attire son armature (26); le contact en charbon, mobile, (27) s'applique contre le contact en charbon, fixe, (28) et ferme le circuit de l'électro d'asservissement (29) alimenté, comme les relais, par une dérivation prise en (14) et (15) sur le potentiomètre.

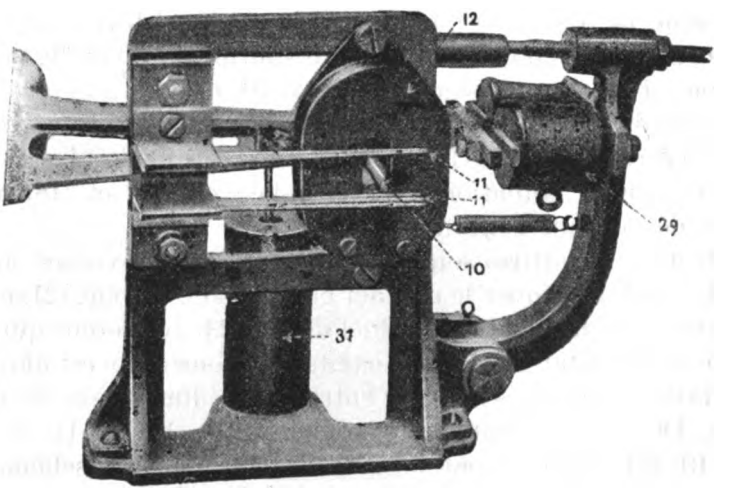


Fig. 22.

Cet électro (29) attire une armature de fer doux (30) fixée à l'extrémité du fléau. Comme l'électro est disposé de façon à se trouver en face de son armature lorsque le fléau est horizontal, son action a toujours pour effet de développer sur le levier un couple qui agit en sens inverse de la variation de tension qu'il s'agit de corriger; l'effet produit est donc bien en tous points comparable à celui d'un asservissement. La compensation est d'ailleurs instantanée, car l'asservissement cesse dès que le contact est rompu entre (10) et (11) ou (11').

Tant que la variation de tension est supérieure à une certaine valeur, qu'il est toujours possible de limiter d'avance en réglant convenablement la distance de (29) à (30), le contact entre (10) et (11) ou (11') est maintenu malgré l'action de (29) sur (30), et

Digitized by Google

l'induit tourne d'un mouvement continu à sa vitesse maxima. Mais lorsque la variation de tension se trouve réduite à la valeur assignée, le contact entre (10) et (11) ou (11′) se trouve brusquement rompu chaque fois que le courant est lancé dans l'induit. L'impulsion reçue par le fléau est amortie dans la cataracte à air (31); puis, l'action de (29) sur (30) se trouvant supprimée, le fléau s'incline à nouveau pour rétablir un nouveau contact tant que la tension n'a pas été ramenée à sa valeur normale. L'induit ne tourne plus alors que par à-coups, et sa vitesse moyenne se trouve d'autant plus réduite que la variation de tension qui reste à corriger est plus faible, car, tandis que les impulsions successives communiquées au fléau pour éloigner (10) de (11) ou (11′) vont en croissant à chaque instant, le couple résiduel qui tend après chaque rupture à ramener (10) vers (11) ou (11′) va au contraire en décroissant.

Conservation des Contacts.

Pour assurer la bonne conservation des contacts, on a mis en œuvre deux moyens distincts: le premier vise la fermeture franche et la rupture brusque des contacts, et le second la réduction automatique du courant qui actionne le relais, avant la rupture du contact.

Pour bien comprendre le rôle que joue la magnétisation de la tige (10), il est nécessaire de considérer au préalable comment varient, en fonction de la distance entre (10) et l'un des fils de contact (11), l'attraction magnétique et le couple élastique développé par la flexion du fil (11).

Si l'on suppose tout d'abord (10) immobile, et si l'on figure horizontalement sur l'axe (*ox*) (figure 23) la distance entre (10) et (11) et verticalement sur l'axe (*oy*) les couples, on voit de suite que le couple développé sur le fil d'acier 11 par l'attraction magnétique est représenté par une courbe hyperbolique telle que AB, tandis que le couple élastique développé par la flexion du fil (11) est représenté par une droite telle que CD. La distance OD correspond évidemment à la distance entre (10) et (11) lorsque celui-ci est au repos et ne développe aucun couple élastique. La distance OD peut donc servir à définir la position de (10).

Désignons par E et F les points de rencontre de CD et

Digitized by Google

de AB et par (*e*) et (*f*) les projections respectives de E et de F sur l'axe des *x*. Tant que la distance du ressort à l'aimant est supérieure à O*e*, le couple magnétique est plus fort que le couple élastique; mais celui-ci devient ensuite prépondérant. Pour une position déterminée de (10) le ressort, abandonné à lui-même, se placera donc à la distance O*e*, qui correspond à une position d'équilibre stable.

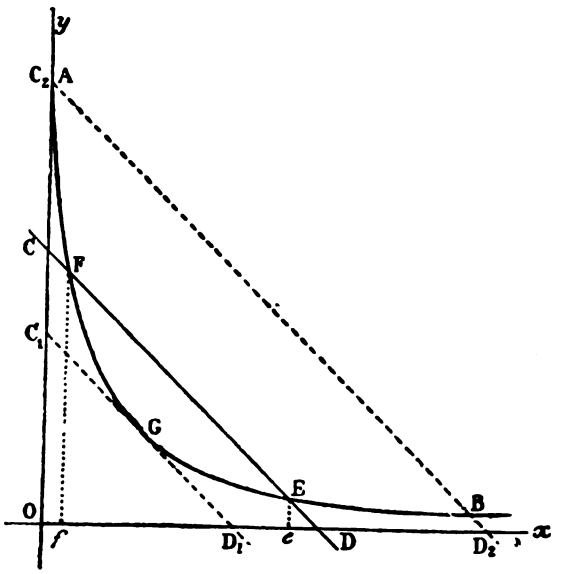


Fig. 23.

Si on déplaçait à la main le ressort de façon à réduire la distance à O*f*, l'attraction magnétique redeviendrait prépondérante, et le ressort serait attiré brusquement jusqu'au contact.

Lorsqu'on déplace (10), la droite CD se déplace parallèlement à elle-même. En considérant en particulier la tangente C_1D_1, on voit que, lorsque (10) aura été amené dans la position définie par OD_1, le ressort sera brusquement attiré jusqu'au contact, car, les deux points E et F étant alors confondus au point G, il n'y a plus de position d'équilibre stable intermédiaire.

L'effort qui applique le ressort contre l'aimant est mesuré par la longueur AC_1. Le contact sera donc toujours établi d'une manière franche. Ce premier résultat est particulièrement appréciable lorsqu'il s'agit de régler la tension d'un générateur

Digitized by Google

fournissant des courants alternatifs, car les vibrations auraient tôt fait, sans cette précaution, de mettre le contact hors service.

On voit de plus que, lorsque le fil 11 aura été amené au contact de la tige aimantée, il faudra déplacer cette dernière jusqu'à la position correspondant à OD_2 pour obtenir la rupture du contact; le fil 11 s'écartera alors brusquement de la quantité D_1D_2. Ainsi se trouve réalisée la seconde condition indispensable pour la bonne conservation du contact.

Lorsque (1) est au voisinage de la position horizontale, l'action de (10) sur (11) est négligeable; d'autre part, lorsque (10) est en contact avec (11), le couple développé autour de (2) par l'attraction de (10) sur (11) est toujours de beaucoup inférieur à celui qui est développé autour du même point par l'action de (29) sur (30) et qui agit en sens inverse; on n'a donc pas à craindre que l'action de (10) sur (11) puisse troubler le réglage.

Lorsque l'armature (19) a été attirée, l'entrefer se trouvant pratiquement nul, on peut diminuer considérablement le courant qui circule dans (13) sans avoir à craindre le relèvement de (20) sous l'influence du ressort de rappel. Pour obtenir automatiquement cette réduction de courant, on détermine le bobinage de (29) de façon que la résistance de ce circuit soit très petite par rapport à la résistance de la partie (14-15) du potentiomètre. Au moment où (27) vient en contact avec (28) la partie du potentiomètre comprise entre (14) et (15) se trouve ainsi shuntée, et la tension entre (14) et (15) peut être ainsi réduite à volonté; on limite d'ailleurs très facilement l'augmentation de courant qui en résulte dans le potentiomètre, en donnant à la partie qui reste en service une résistance beaucoup plus grande que celle de la partie shuntée.

La tension entre (14) et (15) peut être ainsi réduite à une fraction déterminée de sa valeur initiale.

Remarque I. — L'appareil qui vient d'être décrit peut être employé indifféremment:

1° Pour le réglage de la tension;
2° Pour le réglage de l'intensité (fours électriques);
3° Pour le réglage de l'énergie consommée par un circuit;
4° Pour le réglage de la vitesse.

Pour cette dernière application on emploie l'artifice suivant:

Digitized by Google

On sait qu'une machine magnéto donne une tension proportionnelle à la vitesse qu'on lui communique ; on sait également qu'on peut obtenir le même résultat avec une dynamo ordinaire dont le circuit magnétique a été intentionnellement saturé.

On peut donc ramener très facilement la mesure d'une vitesse à la mesure de la tension fournie par une petite génératrice auxiliaire commandée, soit directement par l'arbre moteur, soit encore par un petit moteur synchrone s'il s'agit de courants alternatifs. On est ainsi conduit à employer un tensimètre électrique au lieu et place d'un tachymètre mécanique. Un tel appareil peut être construit avec une très grande précision, et en éliminant complètement tous les inconvénients qu'entraîne l'existence des frottements dans les tachymètres mécaniques.

Remarque II. — Le régulateur électrique, à asservissement magnétique et compensation instantanée, peut être facilement disposé de façon à agir sur un servo-moteur électrique quelconque. Il suffit à cet effet de commander les soupapes hydrauliques à l'aide d'électros aimants. Cette combinaison convient particulièrement bien pour le réglage de la vitesse des groupes comportant des vannages difficiles à manœuvrer.

Remarque III. — Les modérateurs à servo-moteur mécanique répondent mal aux exigences du service pour le réglage de la tension ; comme le temps employé pour effectuer un réglage est proportionnel à l'importance de la variation qu'il s'agit de corriger, ils agissent toujours trop lentement dès que la variation est un peu forte.

Pour obtenir un bon réglage, il ne suffit pas que le modérateur indique le sens de la correction à effectuer, et qu'il provoque l'augmentation ou la diminution de l'excitation chaque fois que la tension est trop faible ou trop forte: il faut encore que l'appareil soit sensible à l'importance de la correction à effectuer, et qu'il provoque la manœuvre du rhéostat avec une vitesse d'autant plus grande que la variation de tension est plus forte.

Ce résultat est pleinement atteint avec le tensimètre qui vient d'être décrit.

Digitized by Google

Quelques applications électrotechniques du ciment armé.

M. Paul Lecler

Ingénieur des Arts et Manufactures - Châtellerault (France).

Le but de cette note est, sans aborder l'étude des propriétés générales ou le mode de calcul des constructions en ciment armé (voir la circulaire ministérielle du 20 octobre 1906), ni même décrire les applications du ciment armé entrées déjà dans la pratique courante, de présenter quelques dispositifs spéciaux permettant aux électriciens de réaliser certaines applications du ciment armé dans de bonnes conditions économiques aussi bien que techniques, au besoin sans personnel spécial.

Ces applications sont les suivantes:

Cloisons et cloisonnements pour tableaux, etc.

Renforcement des poteaux en bois des lignes en service.

Substitution du ciment armé aux autres matériaux de construction, notamment pour caniveaux, regards, bacs, etc.

Cloisons ou Panneaux simples.

L'emploi de panneaux simples, comme écrans ou cloisons, est fréquent.

Ces panneaux sont fabriqués, soit en place, soit à plat, et mis en place après fabrication; leurs armatures sont généralement en petits fers ronds coupés de longueur et assemblés par des ligatures de fil de fer, réunis de manière à faire un quadrillage.

On peut arriver ainsi à faire des panneaux relativement minces, mais le plus souvent les irrégularités des barres obligent

Digitized by Google

à employer des sur-épaisseurs de ciment, pour être sûr que partout le fer est recouvert d'une couche suffisante de ciment.

De plus, la confection de ces armatures sur les chantiers est généralement coûteuse et longue, surtout quand on ne dispose pas d'ouvriers spécialistes expérimentés.

Pour remédier à ces inconvénients on emploie des armatures telles que celles de la figure 1, formées de cadres combinés à des barres droites ou mieux à d'autres cadres. (La figure représente ces deux dispositifs).

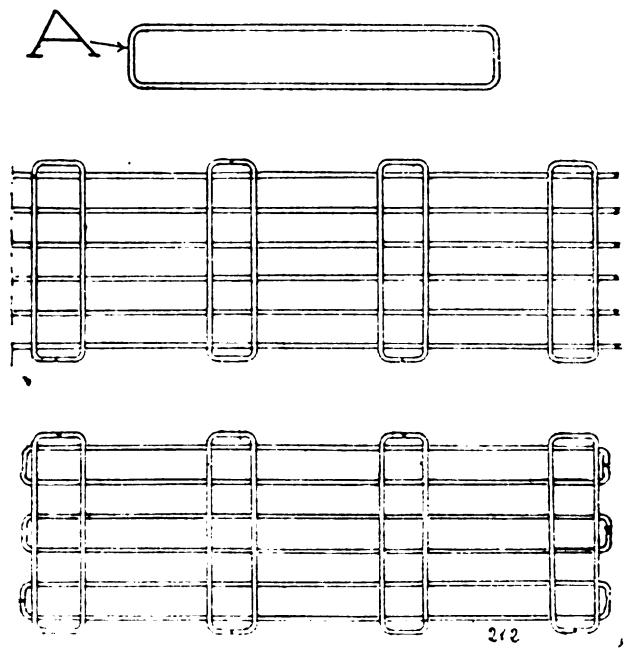


Fig. 1.

Ces cadres sont obtenus mécaniquement, à des conditions de prix très acceptables, bien qu'ils soient fabriqués sur mesures, grâce à l'emploi d'un outillage spécial qui permet de les établir exactement aux dimensions indiquées et avec un très bon dressage, de telle sorte que les armatures obtenues avec ces cadres sont bien régulières et de dimensions exactes.

D'autre part, grâce à la solidarité des côtés de chaque cadre, si pour une raison quelconque une barre se trouve faussée, l'action des autres barres (surtout quand on emploie les attaches élastiques qu'on verra plus loin, et qui agissent comme des le-

Digitized by Google

viers pour rapprocher les barres à réunir) permet de le ramener en place automatiquement, ce qui est difficilement possible avec des barres isolées.

On peut donc avec ces armatures établir des panneaux beaucoup plus minces qu'avec des armatures ordinaires, faites avec des barres coupées sur le chantier même (pas de déchet, etc.).

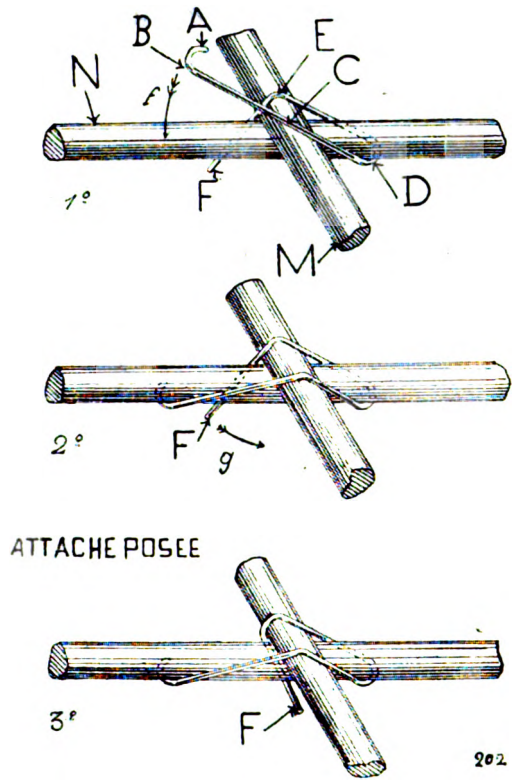


Fig. 2.

Les barres ou cadres formant armatures sont généralement réunies par des ligatures en fil de fer recuit, qu'il est de beaucoup préférable de remplacer par des attaches élastiques telles que celles de la fig. 2, qui ont l'avantage de pouvoir être posés par n'importe quelle manœuvre, sans outils, d'une seule main, tandis que les ligatures ordinaires demandent des ouvriers spéciaux.

De plus ces attaches élastiques permettent au besoin de régler après coup les positions des barres, tandis qu'avec les liga-

Digitized by Google

tures en fil ordinaire le moindre déplacement des barres, une fois la ligature posée, détruit tout serrage.

Cloisonnages composés.

Le mode de construction ci-dessus devient particulièrement avantageux quand il s'agit de cloisonnages composés.

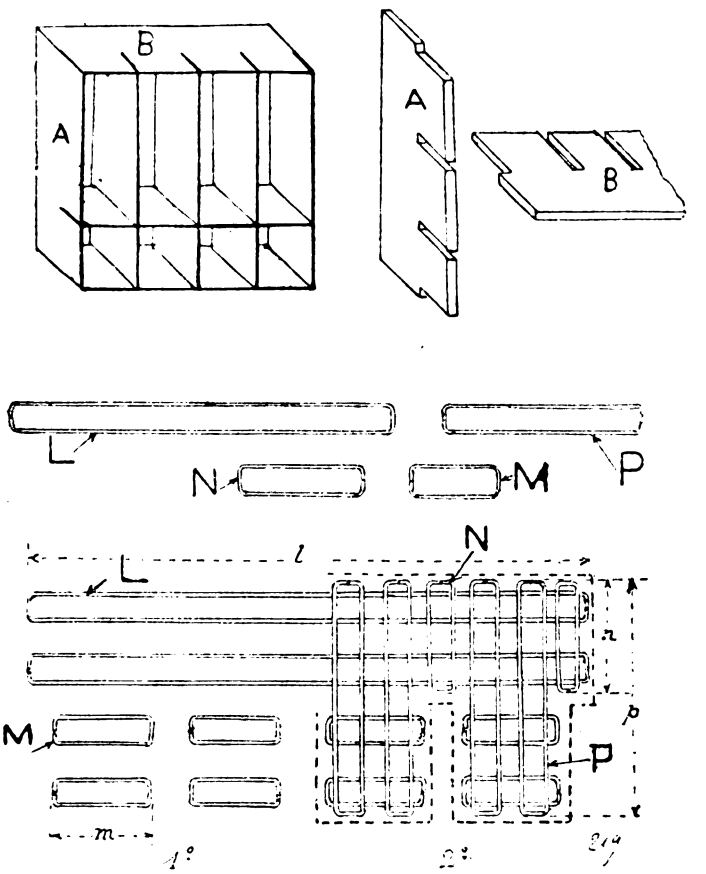


Fig. 3.

Au lieu de monter des armatures en place, et d'exécuter le ciment ensuite, on peut en effet employer des panneaux s'emboitant à demie largeur A et B (fig. 3) (comme des panneaux de menuiserie), qui peuvent être fabriqués facilement à plat et d'avance.

Digitized by Google

On évite ainsi toutes les sujétions dues au moulage des armatures en place (personnel spécial, temps passé, irrégularité des armatures, etc.).

On voit (fig. 3) la constitution des armatures de ces panneaux entaillés, formés de cadres semblables à ceux de la fig. 1.

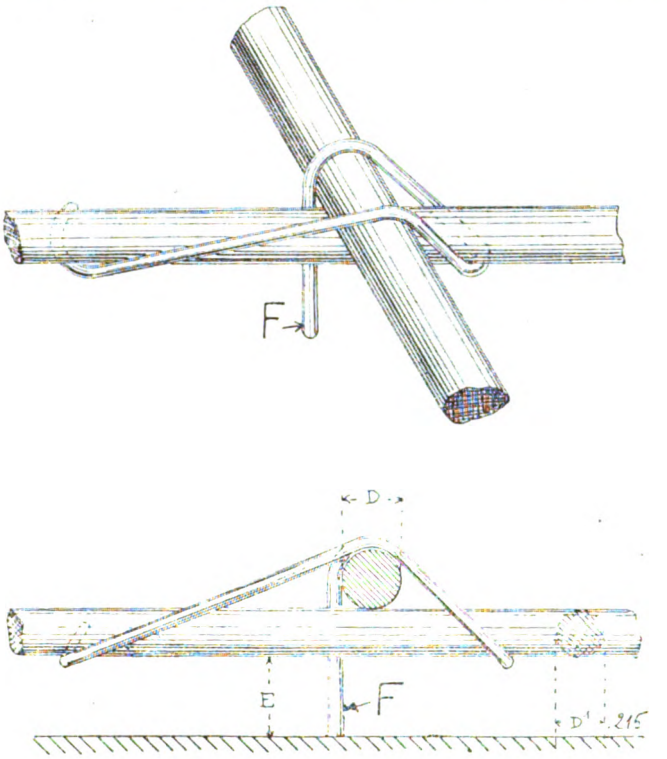


Fig. 4.

Au lieu de fabriquer ces panneaux à plat en mettant d'abord une couche de mortier, l'armature et une seconde couche de mortier, on peut noyer en une seule fois l'armature dans le ciment en employant des attaches telles que celle de la fig. 4, qui règlent de façon invariable la distance de l'armature aux parois du moule.

Renforcement des poteaux en bois en place.

C'est au ras du sol que les poteaux en bois fatiguent le plus, et c'est précisément en cet endroit qu'ils se détériorent le plus

Digitized by Google

vite, de telle sorte qu'il faut les remplacer au bout de quelques années alors que tout le reste serait encore susceptible de faire un bon service pendant longtemps.

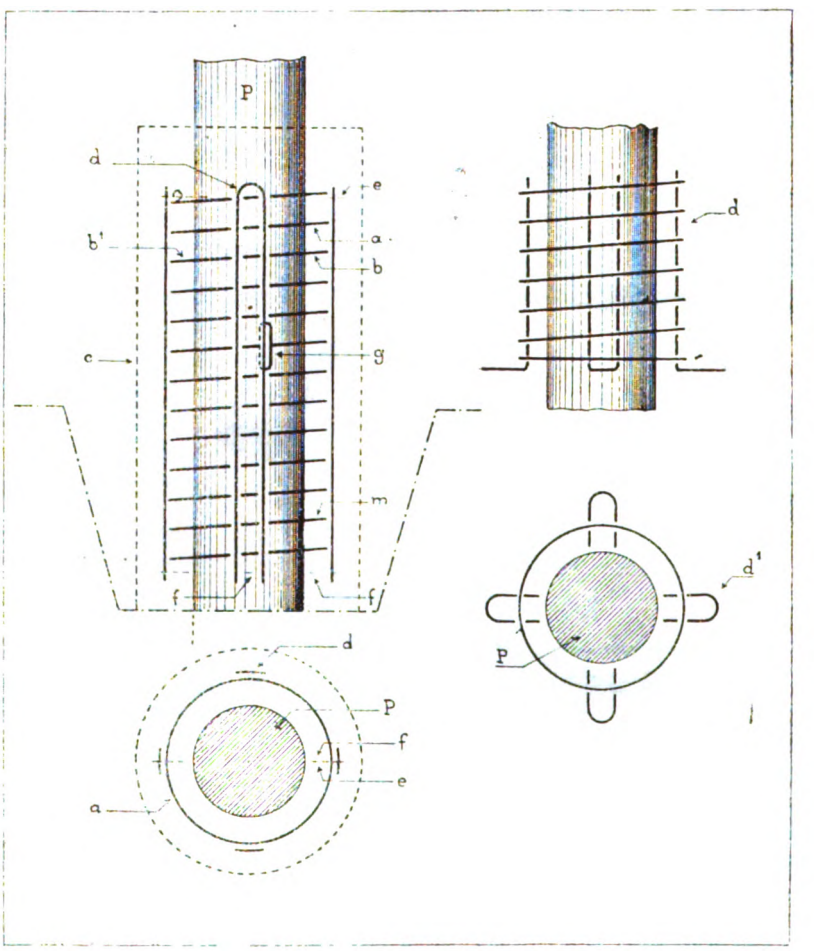


Fig. 5.

En outre, ce remplacement est coûteux et très gênant, tant par le prix des poteaux que par le temps passé et les sujétions qui en résultent pour l'exploitation.

On a cherché depuis longtemps à remplacer la section affaiblie avec du ciment armé, de manière à prolonger notablement la durée du poteau.

Le poteau travaillant surtout à la flexion, l'armature de ren-

Digitized by Google

forcement doit contenir des éléments longitudinaux présentant une résistance au moins égale à celle du poteau intact, ces éléments étant en nombre aussi grand que possible pour une section totale donnée, de manière à avoir une surface d'adhérence aussi grande que possible en vue d'augmenter la résistance au glissement longitudinal.

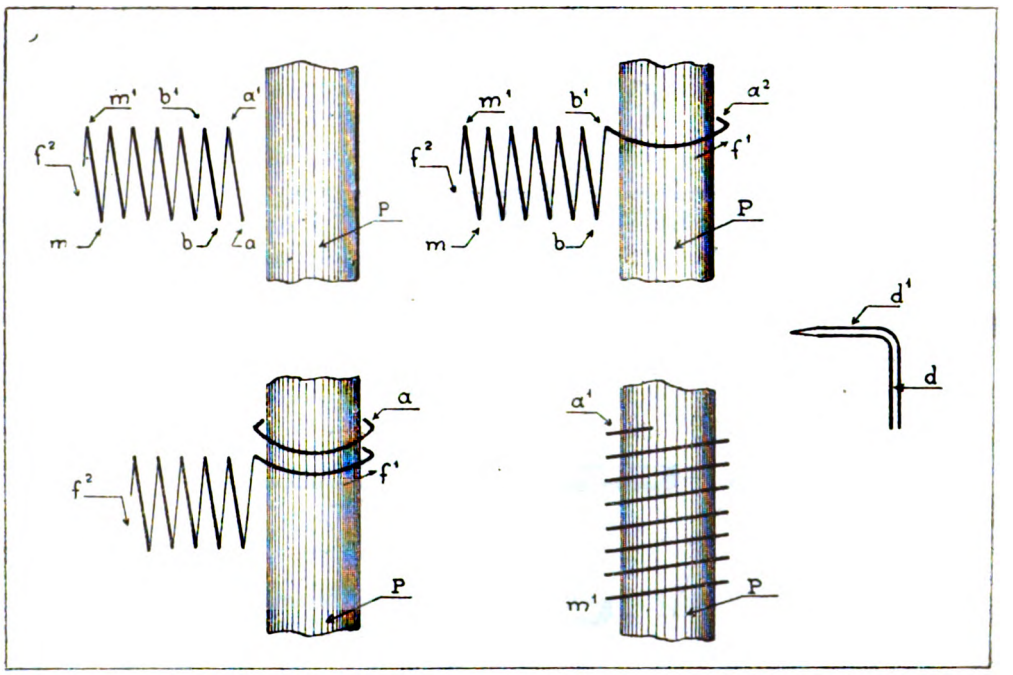


Fig. 6.

De plus l'épaisseur de la couche de ciment étant relativement mince, elle doit encore être armée par des éléments transversaux croisant les éléments longitudinaux.

On pourrait pour cela enrouler autour du poteau un fil de fer, mais cette manière de faire présenterait de nombreuses difficultés, serait coûteuse, et l'armature ainsi obtenue n'aurait aucune rigidité, ce qui rendrait également difficile la mise en place du ciment.

Le dispositif représenté par la fig. 5 permet de remédier à ces inconvénients.

Il est essentiellement composé d'une hélice a et de barres longitudinales d réunies par des attaches g.

Digitized by Google

Ce qui caractérise surtout ce dispositif, c'est la manière dont il est mis en place:

L'hélice est faite mécaniquement d'avance, en fil d'acier élastique, au diamètre qu'elle doit avoir.

Pour la mettre en place on opère, comme le montre la fig. 6, par déformation temporaire: on place l'hélice contre le poteau p, son axe étant à peu près normal à celui du poteau, et on engage son extrémité a^1 sur le dit poteau, en tenant d'une

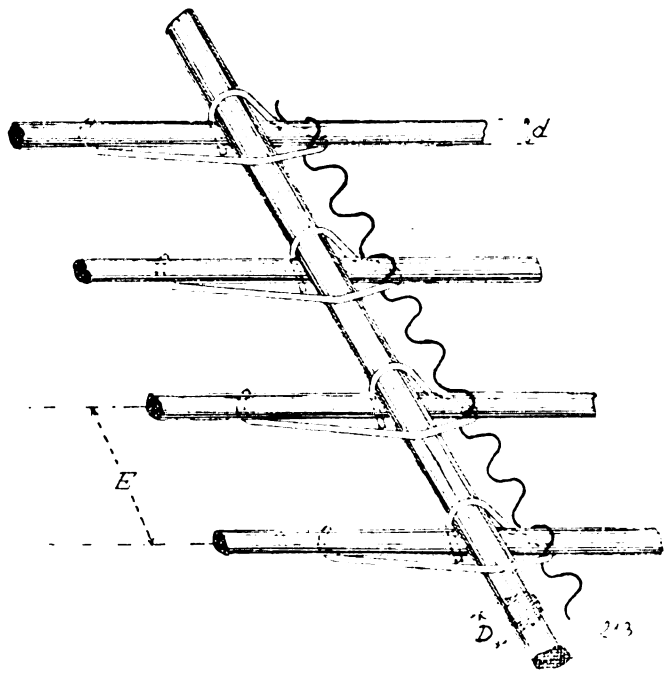


Fig. 7.

main l'hélice, et, en guidant de l'autre l'extrémité a^1 tout en agissant dans le sens de la flèche f, on enroule sans difficultés en quelques instants l'hélice autour du poteau (on peut, pour faciliter cette opération, la faire aussi haut que possible sur le poteau, là où il est de plus petit diamètre).

Ceci fait, on descend l'hélice en la suspendant au besoin à des broches ou tirefonds e, et l'on fixe dessus les cadres d avec des attaches telles que celles de la fig. 4, qui se mettent en place très rapidement et d'une seule main, ce qui est à considérer dans l'embarras de la fouille. De plus, grâce à leurs sail-

Digitized by Google

lies on est sûr qu'il y aura en tous les points une épaisseur suffisante de ciment entre le poteau et l'armature.

Il est préférable d'employer pour le renforcement longitudinal, au lieu de barres simples, des cadres *d* dont les extrémités s'opposent au glissement longitudinal. On peut encore arrêter les extrémités de ces cadres sur des tirefonds ou broches tels que *f* et *g* de manière à mieux solidariser le renforcement et le poteau.

Si l'on veut absolument avoir une répartition régulière des spires d'hélice, on peut combiner aux éléments précédents un fil ondulé disposé comme l'indique la fig. 7.

Une fois l'armature mise en place, il reste à la garnir de ciment. Comme, avec le dispositif de la fig. 5, les dimensions de l'hélice et par suite celles de l'armature sont bien régulières, on peut facilement employer un moule en une ou deux parties.

Au besoin on peut étayer le poteau pendant l'opération.

Il suffit alors d'un jeu de quelques moules, et d'un matériel peu coûteux pour réparer les poteaux d'une ligne à peu de frais sans interruption de service avec une équipe de quelques hommes.

Caniveaux et conduits.

En terrain suffisamment résistant, on peut faire les caniveaux en simple béton de ciment, non armé.

Toutefois, en général, et notamment en mauvais terrain, quand l'emplacement est limité, ou encore si on est exposé à des sous-pressions, il est préférable d'armer les caniveaux et les conduits, ce qui peut se faire très simplement en utilisant des cadres faits mécaniquement et repliés suivant le profil du caniveau (fig. 8). Avec ces cadres, qui se tiennent d'eux-mêmes debout, le montage est très simple, toujours en employant les attaches ci-dessus décrites (fig. 2).

Il est à remarquer que, ces cadres pouvant être combinés avec des barres longitudinales telles que celles qu'on trouve couramment dans le commerce, leur emploi devient très avantageux eu égard aux économies qu'ils permettent de réaliser tant sur la main d'œuvre que sur la matière, les dimensions du ciment étant réduites au minimum à cause de l'exactitude des dimensions de ces cadres.

Digitized by Google

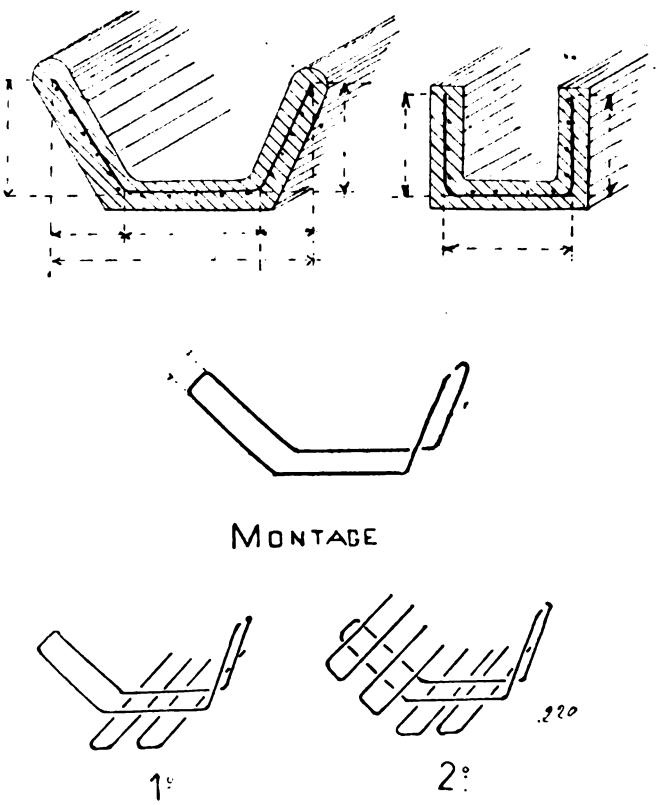


Fig. 8.

Regards, trous de suite, bacs, etc.

Dans nombre de cas, notamment dans les canalisations souterraines, il faut établir des regards, trous de suite, boites de fonction, etc.

On emploie dans ce but, soit la maçonnerie ordinaire, le ciment non armé ou la brique, soit la fonte.

Le ciment armé offre par rapport à la maçonnerie l'avantage de nécessiter des dimensions extérieures beaucoup moindres pour la fouille ainsi qu'un moindre cube de matériaux, sans parler de sa résistance plus grande.

Comparé à la fonte, il est beaucoup plus économique dans les épaisseurs usuelles, puisqu'on peut descendre, notamment en appliquant les attaches de centrage déjà décrites, à des épais-

Digitized by Google

seurs de 3 ^{cm} et même moins pour des pièces en ciment faites par coulée, c'est-à-dire très économiquement.

La fig. 9 est donnée à titre d'exemple d'applications, mais on comprend sans peine qu'il soit facile d'établir, en suivant les mêmes principes, des armatures différant même très notablement dans les détails des dispositifs décrits.

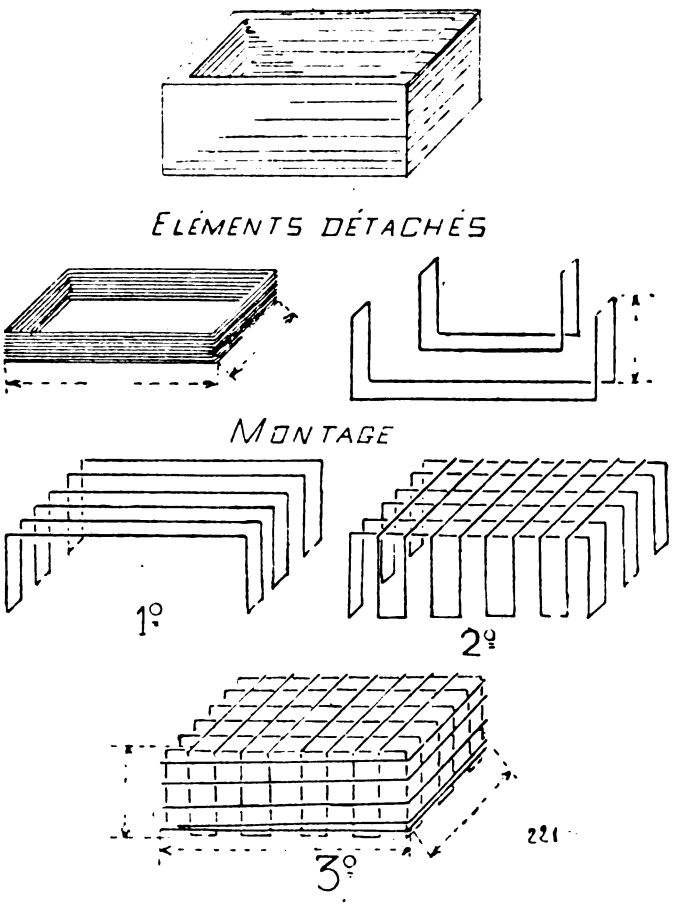


Fig. 9.

D'ailleurs les armatures de la fig. 9, comme toutes celles qui ont été décrites avant elles, ne sont que des cas particuliers d'un système spécial (Centrator P. Lecler, Châtellerault) applicable à toute construction en ciment armé, ayant pour but d'obtenir une fabrication rapide et économique du ciment armé

Digitized by Google

sans ouvriers spéciaux et dont les caractéristiques peuvent être résumées comme suit:

1° En ce qui concerne le montage des armatures sur le chantier:

suppression de toutes ligatures ordinaires, et leur remplacement par des attaches élastiques se posant instantanément, sans outils ni apprentissage; par suite facilité de monter, au lieu même d'emploi des armatures quelconques dont les éléments séparés peuvent être apportés facilement sur le chantier.

2° En ce qui est relatif à la préparation des éléments d'armature:

fabrication en usine avec un outillage spécialement étudié dans le but d'une production économique de ces éléments sur mesures spéciales.

Les armatures pour grosses constructions (poutres, etc.) comportent d'une part des pièces lourdes, ou grosses barres utilisées telles qu'elles sont livrées par les forges, ou tout au plus coudées ou fendues à leurs extrémités, ce qui peut se faire facilement sur n'importe quel chantier, et, d'autre part, des pièces légères telles que étriers, spires d'hélice de section circulaire ou polygonale, qui, avec les moyens actuels ne peuvent être préparées sur les chantiers que par des spécialistes, et encore d'une manière irrégulière, lente et coûteuse.

La meilleure solution dans ce cas est de prendre seulement ces pièces secondaires en système Centrator, et de faire venir directement des forges les grosses barres sur les chantiers.

On supprime ainsi toute difficulté de préparation des éléments d'armatures sur le chantier, et comme les difficultés de leur montage disparaissent par l'emploi des attaches élastiques à pose instantanée, on voit que l'on arrive ainsi à produire très économiquement et très facilement des armatures qui présentent, comparativement aux autres, le grand avantage d'avoir des dimensions transversales exactes (les étriers et spires étant fabriqués mécaniquement) de telle sorte qu'on peut régler les coffrages ou moules sur les armatures elles-mêmes, ce qu'il est impossible de faire avec les étriers ou spires faits à la main, d'où nouvelle et considérable économie, sans parler de la facilité de construction qui en résulte.

Ce système paraît donc susceptible de rendre des services aux électriciens, notamment aux entreprises ayant des usines dans des localités éloignées de grands centres.

Digitized by Google

Sezione III

ISTRUMENTI E METODI DI MISURA
PROTEZIONE DEGLI IMPIANTI - DIVERSI

Presidente	A. E. KENNELLY	(U. S. A.)
Vice Presidenti	A. DINA	(Italia)
	H. ARMAGNAT	(Francia)
Segretari	A. BARBAGELATA	(Italia)
	G. CAMPOS	(Italia)
	L. EMANUELI	(Italia)

Digitized by Google

Digitized by Google

LE COMPTEUR ÉLECTRIQUE

Influence de la nature et des différents régimes de charge. Erreurs - Irrégularités de marche.

Rapporto sul tema N. 18 del Congresso.

Relatore M. A. DURAND

Ingénieur Électricien Chef de Travaux au Laboratoire central d'Électricité (Paris).

Bien que depuis dix ans de nombreux types de compteurs aient surgi, il ne semble pas que l'exactitude de ces appareils se soit améliorée.

On trouve, toujours, les mêmes causes d'erreurs, causes provenant de l'appareil proprement dit, de ses accessoires, de la nature du courant employé, et de diverses influences extérieures.

Nous allons, dans ce qui suit, examiner l'état actuel de cette question et, pour cela, nous diviserons ce rapport en 3 parties.

I. — *Essais de réception* faits au Laboratoire, c'est-à-dire dans les conditions les plus avantageuses pour la marche du compteur.

II. — *Essais faits en ville*, c'est-à-dire dans les conditions mêmes d'emploi.

III. — *Précision* des appareils de contrôle.
Résultats des essais d'approbation officielle.
Conclusions.

I.

Essais de réception au laboratoire.

Un certain nombre d'États européens soumettent les types de compteurs à l'approbation gouvernementale.

Les erreurs tolérées, différentes pour les divers pays, sont résumées dans le tableau ci-après, où, pour avoir un terme de comparaison, nous les avons rapportées aux points demandés dans l'arrêté ministériel français.

Digitized by Google

Tolérances sur les indications des compteurs à courants continus et alternatifs. Erreurs relatives pour cent.

1° — Essais sur courant continu ou courant alternatif à la fréquence et tension normales, facteur de puissance 1.

PAYS	CHARGES 1/1	1/2	1/10	1/20	*Observations*
Angleterre	± 2	± 2	± 2	...	
„	± 3	± 3	± 3	...	Compteurs de 3 ampères et au-dessous.
Allemagne	± 3,3	± 3,6	± 6	± 9	
Autriche .	± 4	± 4	± 4	...	
Espagne. .	...	± 4	...	...	
France . .	± 3	± 3	...	± 5*	* Au-dessous de 500 wats l'essai au $^1/_{20}$ est remplacé par un essai à 20 watts: l'erreur absolue ne doit pas dépasser ± 2 watts.

2° — Influence de la fréquence. Charge $\frac{1}{2}$.

	VARIATION DE LA FRÉQUENCE	ERREUR RELATIVE %	
Angleterre	± 10 %	± 2	
„	...	± 3	Compteurs de 3 ampères et au-dessous.
Autriche .	± 2 %	± 4	
France . .	± 5 %	N ± 1	N étant la valeur trouvée à la fréquence normale.

3° — Influence du facteur de puissance 0,5. Charge $\frac{1}{2}$.

	ERREUR RELATIVE %
Allemagne	± 7,1
France . .	± 3

Digitized by Google

4° — Influence d'une variation de tension de $\pm 5\,\%$.

PAYS	ERREUR RELATIVE %	*Observations*
Autriche	. . . . .	Influence nulle.

5° — Influence des courts circuits (10 fois l'intensité maximum du compteur).

France	N $\pm$ 1	N étant la valeur trouvée à demi charge avant le court circuit.

6° — Puissance tolérée pour la marche à vide.

Angleterre	Nulle même avec 10 % d'augmentation de tension.
Allemagne	$\frac{2,5}{1000}$ P P étant la puissance du compteur.
Autriche	$\frac{1}{5000}$ P »
France	Nulle.

7° — Puissance amenant le démarrage.

Autriche	$\frac{1,5}{100}$ P	Compteur au-dessus de 3 ampères.
»	$\frac{2}{100}$ P	Compteurs de 3 ampères et au-dessous.
France	$\frac{1}{100}$ P	Compteur au-dessus de 500 watts.
»	$\frac{2}{100}$ P	Compteur de 500 watts et au-dessous.

8° — Consommations internes.

France	1° Fils principaux: Ampèreheuremètres . . . . . 1,5 volts. Wattheuremètres au-dessus de 500 watts . 1 » Wattheuremètres de 500 watts et au-dessous 1,5 » 2° Enroulements dérivés: Courant continu . . . . . 4 watts par 100 volts. Courant alternatif . . . . 1,5 » par 100 volts.

9° — Compteurs avec transformateurs.

France	L'erreur relative au $\frac{1}{20}$ de charge est seule portée à $\pm$ 7.

Digitized by Google

L'examen des différentes causes d'erreurs et d'irrégularité de marche va nous montrer la nécessité de ces tolérances qui peuvent paraître excessives.

Les causes sont :

1° Les variations de température ;
2° Les variations de tension ;
3° Les frottements ;
4° L'influence des champs magnétiques extérieurs ;
5° L'action des courts circuits ;
6° L'emploi des shunts ;
7° La marche à vide ;
8° Les variations de fréquence et forme de l'onde ;
9° Les décalages des courants ;
10° Les transformateurs ;
11° Les courants de Foucault ;
12° Le montage.

Nous indiquerons, pour chacun de ces points, les types de compteurs influencés, en laissant de côté pour l'instant les compteurs électrolytiques ainsi que les compteurs spéciaux (à dépassement, charge complexe, change tarif, etc...) qui seront examinés en dernier lieu.

1. — Influence de la température.

Les essais de compteurs doivent être faits dans les conditions mêmes où ces appareils sont employés, c'est-à-dire sur l'appareil fermé ; car la température à l'intérieur de la boîte dépend de la température extérieure, de l'énergie perdue dans les enroulements ainsi que celle provenant des courants de Foucault dans l'amortisseur.

A) Wattheuremètres :

Compteurs moteurs dérivés du type Thomson. — Dans ces compteurs l'énergie perdue dans les enroulements est loin d'être négligeable.

Les tolérances françaises sont : 4 watts par 100 volts dans le circuit dérivé, et 1 volt [1] pour la chute de tension dans l'enroulement inducteur. Cette dernière chute de tension est, évidemment, trop élevée pour les compteurs de gros calibres, mais

[1] Pour les modèles au-dessus de 500 watts.

Digitized by Google

elle ne dépasse pas, beaucoup, les valeurs trouvées sur les compteurs de 10 à 15 ampères.

La dépense, dans le fil fin, varie selon les constructeurs, de 3 à 3,5 watts par 100 volts. La puissance totale perdue dans un compteur de 110 volts 10 ampères, fonctionnant à pleine charge, sera donc, d'environ, 15 watts.

Si, maintenant, nous examinons la marche d'un compteur fermé dans lequel les pertes sont plus fortes (compteurs 3 fils 220 volts) avec circuit dérivé branché sur la tension totale, nous pourrons constater que l'étalonnement effectué en comptant les tours de disque, donnera, à pleine charge, des indications variables d'un instant à l'autre; ceci est dû à l'influence de la température de l'air dans la cage.

Un thermomètre, placé à l'intérieur, indiquera *dans un modèle nouveau*, sous l'influence seule du circuit de tension, un échauffement de 10 degrés centigrades; tandis que, si nous faisons fonctionner le compteur à pleine charge, l'échauffement total sera de 25 degrés centigrades. La température, à l'intérieur du compteur, atteindra 50 ou 60 degrés selon la température extérieure.

L'élévation de température interne diminue le couple moteur et le couple amortisseur; il serait donc possible, théoriquement, de compenser cette action en se servant du même métal ou alliage pour l'amortisseur et pour le circuit fil fin.

Cette compensation, avec les amortisseurs en cuivre ou aluminium, ne saurait être rigoureuse et ne peut être obtenue que pour la tension normale; car les variations de la tension ne produiront pas les mêmes variations de résistance sur l'amortisseur et sur l'enroulement fil fin dont la température est forcément plus élevée; d'autre part, pour la même cause, la variation de température ambiante n'agira pas, sur eux, dans la même proportion.

La variation de résistance du circuit dérivé étant plus forte que celle de l'amortisseur, certains constructeurs se servent, pour l'amoindrir, d'alliages, sans coefficient de température, mis en série, dans une certaine proportion, avec la bobine mobile; mais on voit qu'il y a erreur complète de donner à ce circuit un coefficient de température nul, car alors l'erreur devient maximum; d'autre part, si ce circuit a un coefficient de température trop grand, le courant dérivé variera, pour la même tension, avec la résistance du circuit et les indications du comp-

Digitized by Google

teur auront un coefficient de proportionnalité variable à chaque instant.

La solution serait, donc, d'employer pour l'amortisseur et le circuit dérivé des alliages sans coefficient de température; mais leur grande résistivité forcera à augmenter, soit le nombre des aimants, soit plutôt le diamètre de l'amortisseur, de façon à conserver un couple freinant suffisant.

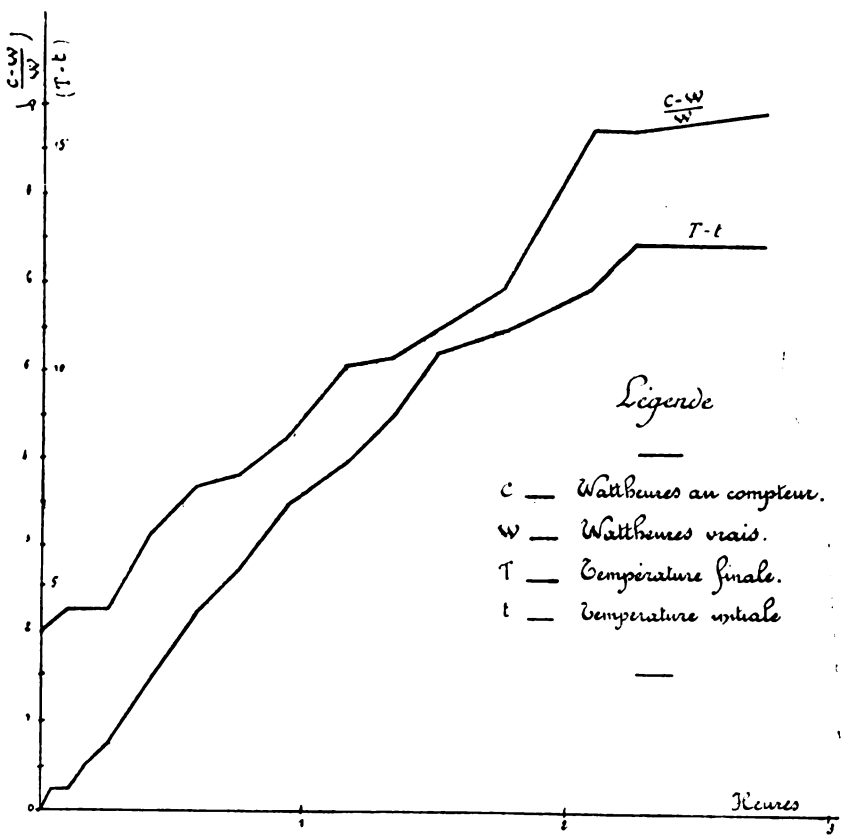


Planche 1.

Il existe des compteurs chez lesquels la compensation est obtenue à moins de 1 % pour la tension normale. L'erreur relative, pour les compteurs non compensés, est d'environ 4 % d'avance par 10 degrés centigrades d'élévation de température.

Le compteur dont il a été question plus haut, avait ses indications, en partie, compensées; malgré cela l'erreur était encore

Digitized by Google

de 3 % entre le début et la fin de l'essai (2 heures à pleine charge); elle aurait été au moins de 10 % sans cette compensation à condition que la température extérieure ne varie pas.

La température de l'amortisseur varie, également, avec la position qu'il occupe dans le compteur, car, malgré l'agitation de l'air par le système mobile, la température de l'air est plus élevée au sommet de la boîte.

Ce qui précède montre combien il est défectueux d'étalonner les compteurs à l'air libre, car on réduit, ainsi, aux seules variations de la température ambiante l'irrégularité de marche des compteurs, tandis qu'en réalité l'action des échauffements internes peut être prépondérante. Dans le cas cité, ces différences d'étalonnement n'auraient pas été constatées.

La planche (1) montre, en fonction du temps, la variation totale de l'erreur relative, avec l'échauffement interne, pour un compteur (15 ampères 230 volts) d'un type *extrêmement* répandu, ainsi que la variation de la température de l'air à l'intérieur de la cage.

L'erreur relative (avance) a augmenté de 6 % pour une élévation de température d'environ 13 degrés centigrades. Le coefficient, ainsi trouvé, dépasse $\frac{4}{1000}$ par degré centigrade; cela tient, sans aucun doute, à la façon dont la température interne était déterminée.

L'essai a été fait en établissant, en même temps, la tension et le courant; l'erreur provenant de l'échauffement dû à la tension seule est d'environ 2 %.

La température ambiante a monté, pendant cet essai, de 2 degrés centigrades; l'intensité du courant, dans l'enroulement dérivé, est restée constante (pour la même tension), ce qui indique un coefficient de température nul pour la résistance de cet enroulement, et explique l'avance de compteur.

Compteurs oscillants (*type* AEG). — Ces appareils auront aussi un coefficient de température; toutefois comme la consommation dans le fil fin est faible (1,5 watts par 100 volts) l'échauffement dû au circuit dérivé aura moins d'influence.

Compteurs pendulaires (*Aron*). — Ce type de compteurs étant dépourvu d'amortisseurs, aura un coefficient de température négligeable, sauf toutefois si ces compteurs sont employés avec un shunt.

Compteur O'K *à shuntelet.* — Ce compteur, tout nouvellement

Digitized by Google

imaginé, a un coefficient de température d'environ 1,5 % par 10 degrés, mais, comme tous les appareils basés sur les principes thermiques, ses indications ne suivront pas instantanément les variations de la puissance.

B) AMPÈREHEUREMÈTRES:

Compteur O'K (*sans frein*). — Ces appareils ne dépendront de la température que si le shunt a lui-même un coefficient.

Ampèreheuremètres moteurs avec frein. — Dans ces compteurs le circuit moteur mis, en dérivation, aux bornes d'un shunt est adhérent à l'amortisseur; il en résulte que ce dernier prend bien la température de l'induit et réciproquement. Les variations de température interne ont alors une influence peu importante surtout si le shunt est extérieur.

Ampèreheuremètres moteurs à mercure. — Ces compteurs très répandus en Angleterre sont montés, souvent, sur shunt, et doivent, donc, avoir un coefficient de température; ils ont l'avantage d'avoir une consommation interne très faible.

C) COMPTEURS SPÉCIAUX POUR COURANTS ALTERNATIFS:

Compteurs d'induction. — Le coefficient de température $\left(\frac{1}{1000}\text{ par degré}\right)$ est beaucoup plus faible chez ces appareils où le couple amortisseur et le couple moteur agissent sur le même disque; par conséquent la variation de résistance du disque sera sans influence.

L'erreur est due aux variations de résistance du circuit dérivé ainsi qu'à celles des dispositifs servant à régler le décalage.

On peut réduire, dans un grand limite, l'erreur provenant du fil fin en rendant négligeable la résistance ohmique devant l'impédance totale du circuit; cette condition est, aussi, à réaliser pour amener le plus près possible de 90° le décalage entre la tension aux bornes et le courant dérivé.

Il est à remarquer que l'énergie perdue dans les enroulements est minime (1,5 watts par 100 volts pour le circuit de dérivation) et environ 4 watts pour les bobines série; l'échauffement interne, provenant également des pertes dans les tôles, ne dépassera que de quelques degrés la température ambiante.

Digitized by Google

2. — Variations de tension.

Les variations de tension du réseau ne changeront pas, sensiblement, la constante des compteurs qui sont dépourvus de fer (compteurs moteurs, pendulaires, etc....) à condition toutefois que le circuit dérivé ait un faible coefficient de température.

L'action de la tension agira, par le compoundage, sur le démarrage des compteurs à collecteur et produira, souvent, grâce aux trépidations, une marche à vide qui, pour ces types de compteurs, est le plus souvent insignifiante et qui, du reste, cesse rapidement avec l'encrassement des balais et du collecteur.

Compteurs d'induction. — Il n'en est pas de même pour les compteurs d'induction, dont certains modèles peuvent avoir des écarts de plusieurs pour cent sous l'influence d'une variation de $\pm$ 10 % de la tension normale; cet effet est produit par la variation de l'induction des tôles sur lesquelles sont enroulées les bobines de tension, ainsi que par la variation du couple amortisseur provenant de ces bobines.

3. — Influence des frottements. Balais, Pivotage, Étanchéité.

Les frottements parasites proviennent des balais et des pivotages.

A) Balais.

Compteurs wattheuremètres à collecteur. — Le serrage des balais des compteurs à collecteur peut faire diminuer de 10 % les indications des compteurs (au dixième de la charge maximum); il y aurait, donc, intérêt à généraliser les dispositifs permettant de remettre en place les balais, avec la même pression.

La résistance électrique du contact, entre les balais et le collecteur, change à cause des petites étincelles de rupture qui éclatent sous l'influence des poussières; si donc une cause étrangère n'intervient pas pour faire cesser l'altération qui en résultera, celle-ci ira en s'aggravant, et cela d'autant plus vite que la tension aux bornes sera plus élevée. Il pourra même arriver un court circuit entre deux lames, ce qui aura pour conséquence de faire retarder le compteur de 10 % sous la pleine charge et de l'arrêter, s'il est à faible charge.

Digitized by Google

Les étincelles peuvent aussi provenir de la rupture d'un des fils de l'induit; l'erreur sera du même ordre de grandeur.

Les balais vibrants employés par la Compagnie des Compteurs de Paris facilitent beaucoup les démarrages et améliorent la courbe d'étalonnement.

Ampèreheuremètres à collecteur. — Dans ces compteurs la différence de potentiel aux balais étant de l'ordre du volt, l'altération du collecteur sera minime surtout dans le type O' K, où le courant circulant dans l'induit est très faible.

Toutefois, pour les compteurs freinés l'altération aura pour conséquence de changer la résistance du circuit de l'induit et d'amener un retard dans les indications.

La Société AEG emploie un dispositif permettant aux balais de prendre, sur le collecteur, une place différente; en outre les lames du collecteur sont inclinées, ce qui améliore la courbe du compteur.

Ampèreheuremètres moteurs à mercure. — Ces appareils n'ont pas de balais, mais l'amalgamation du disque et l'altération du mercure augmentent les frottements à la longue.

B) Pivots:

L'usure des pivots et des pierres sera d'autant plus faible que le poids et la vitesse du système mobile sont moindres. Le frottement des pivots aura, aussi, d'autant moins d'influence que le couple moteur sera plus fort.

L'amortisseur en aluminium a une grande légèreté, mais sa résistivité plus forte diminue le couple résistant.

Il ne suffit pas d'avoir un couple massique $\frac{C}{M}$ élevé, car ce rapport peut être grand sans pour cela que le couple C soit fort; il faut se rappeler, qu'outre le frottement du pivot sur la pierre, l'entraînement de la minuterie exigera un effort supplémentaire qui entravera, par moments, la marche du compteur.

Les cassures ou fêlures du saphir produisent des erreurs qui sont de l'ordre de 10 % (au dixième de la charge maximum); ces fêlures sont produites soit par des chocs (trépidation des planchettes), soit par les vibrations dues aux courants alternatifs passant dans les enroulements.

J'ai connaissance d'une installation où cette dernière cause oblige à changer les saphirs à des intervalles très rapprochés (tous les mois).

Digitized by Google

C) ÉTANCHÉITÉ:

Bien peu de compteurs sont à l'abri de l'entrée des poussières et de l'humidité. Il faut avouer que les cages sont à ce point de vue très mal conçues; sauf, bien entendu, celles qui sont massives. Il y aurait là de grands progrès à réaliser, progrès qui régulariseraient la marche des appareils et diminueraient les frais d'entretien.

4. — INFLUENCE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES EXTÉRIEURS.

Nous examinerons 3 cas:

A) Action terrestre.

B) Action des câbles amenant le courant dans le compteur.

C) Action de courants alimentant des circuits ne passant pas dans le compteur.

A) ACTION TERRESTRE:

L'action de la composante horizontale du champ magnétique terrestre n'est pas toujours négligeable; il suffit, pour s'en rendre compte, d'étalonner au $\frac{1}{20}$ de sa charge maximum un compteur d'énergie à collecteur à champ inducteur horizontal, et de faire l'essai en mettant l'axe du champ inducteur dans le plan du méridien magnétiqne. Les épreuves faites dans 2 directions à 180° l'une de l'autre auront des écarts de 8 à 12 pour cent. Cette erreur dépendra peu du calibre du compteur, puisque les champs inducteurs sont du même ordre de grandeurs.

Ceci montre qu'il ne faut pas se contenter du réglage effectué au laboratoire, mais qu'il est nécessaire de corriger sur place l'action du champ terrestre, en agissant sur le compoundage.

B) ACTION DES CABLES AMENANT LE COURANT DANS LE COMPTEUR:

Cette action ne se manifeste que dans les gros calibres; elle intervient, uniquement, pour changer l'étalonnement du compteur; c'est donc un nouveau réglage à effectuer; mais cette action, purement locale, est suffisante pour motiver l'essai du compteur à sa place définitive ou, tout au moins, pour faire disposer de la même façon (au laboratoire) l'arrivée des câbles.

Digitized by Google

C) ACTION DES COURANTS ALIMENTANT DES CIRCUITS NE PASSANT PAS DANS LE COMPTEUR:

Les causes d'erreur ci-dessus pouvaient être corrigées par les dispositifs de réglage, tandis que celles-ci ne pourront être évitées qu'en plaçant judicieusement les compteurs sur les tableaux de distribution, ou en les munissant de cages protectrices en fer.

Ce sont encore les compteurs d'énergie dérivés du type Thomson qui sont le plus influencés à cause de leur champ interne faible (environ 60 gauss). Un de ces compteurs placé sur un tableau de distribution entre 2 câbles traversés par des courants de 1500 ampères fournis par des machines différentes, tournait à vide, dans un sens ou dans l'autre selon que le courant passait dans le câble de droite ou de gauche.

De même, j'ai constaté sur un tableau qu'un compteur de 300 ampères, fonctionnant au dixième de sa charge, subissait des variations de plus de 10 % quand un compteur de même puissance placé à 23 centimètres (distance d'axe en axe) était mis en marche à pleine charge; au vingtième de charge l'erreur était de 20 %. Il suffisait d'intercaler une plaque de tôle entre les 2 appareils pour réduire cette action mutuelle.

Les fuites magnétiques des dynamos placées au voisinage des compteurs ont aussi une grande action.

C'est pour remédier à ces influences magnétiques que certains constructeurs (C.ie Aron — C.ie pour la fabrication des compteurs — Société A. E. G.) font des systèmes astatiques, mais ces systèmes ne sont réellement astatiques que si le champ est uniforme; néanmoins il vaudra toujours mieux les employer.

Ampèreheuremètres. — Les champs extérieurs auront peu d'importance sur les ampèreheuremètres à collecteurs dont l'organe mobile tourne entre les pôles de l'aimant. Toutefois le magnétisme de l'aimant pourra en être amoindri.

Compteurs d'induction. — Sur les compteurs d'induction les actions sont beaucoup moindres, car les bobines série sont, en général, enroulées sur des tôles, et ont un champ plus fermé que celui des inducteurs des compteurs à collecteurs.

5. — INFLUENCE DES COURTS CIRCUITS.

Wattheuremètres, type Thomson. — Le court circuit agit mécaniquement en rapprochant les bobines, mais il agit surtout sur l'aimant amortisseur, dont il fait varier le magnétisme.

Digitized by Google

Un court circuit est limité, dans une installation, par les résistances de la source, de la ligne, et du contact du court circuit proprement dit; l'intensité du courant dépendra, donc, de circonstances locales et ne peut, par conséquent, être définie.

Les courbes oscillographiques [1] reproduites, ici, montrent l'ordre de grandeur de l'intensité du courant, continu ou alternatif, passant dans un court circuit avec les installations dont nous disposons au Laboratoire Central d'Électricité.

Les essais ont été faits en protégeant les compteurs par un plomb fondant à 20 ampères, c'est-à-dire au double de la charge maximum du compteur.

Sur les planches:

I représente l'intensité du courant;

U représente la différence de potentiel aux bornes de l'ensemble (ligne, compteur et fusible);

S est la courbe alternative de fréquence 42 du Secteur de la Rive gauche.

Les écarts, entre les sinusoïdes, sont quelquefois différents; cela tient au mouvement irrégulier [2] de la pellicule photographique. La courbe S a été prise dans le but de mesurer le temps.

Planche 2. — *Court circuit* effectué sur *courant continu* fourni par des *accumulateurs*.

La différence de potentiel aux bornes de l'ensemble (ligne, fusible et compteur) avait été calculée pour avoir, pendant le court circuit, une intensité de 100 ampères. L'intensité du courant a été seulement de 65 ampères.

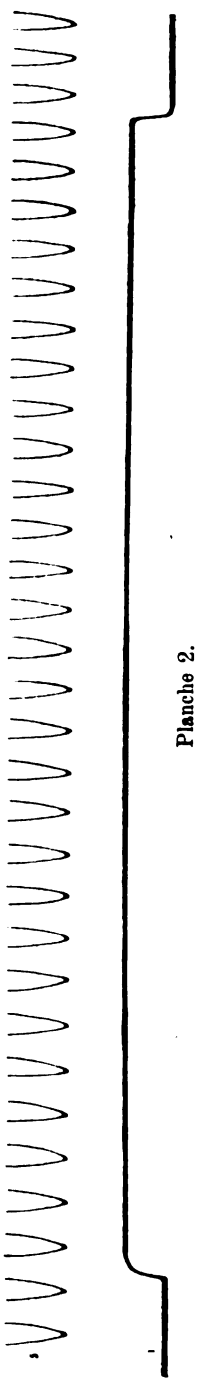


Planche 2.

---

[1] Je remercie mon Collègue, M. De la Gorce et M. Testavin pour leur collaboration dans ces essais.

[2] Le mouvement était entretenu à la main.

Digitized by Google

Le court circuit a duré environ $^{7}/_{10}$ secondes. Cette courbe montre ce que peuvent faire l'état de charge et la résistance intérieure des accumulateurs.

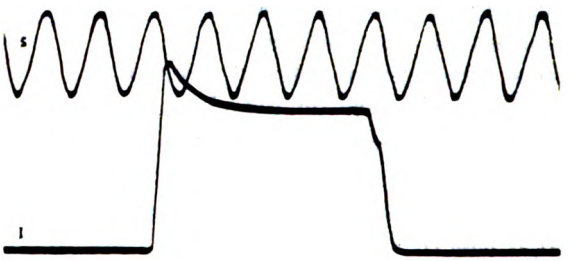


Planche 3.

Planche 3. — *Court circuit* sous 220 volts *sans résistance de protection* pour limiter l'intensité du courant.

Le courant était fourni par les mêmes batteries d'accumulateurs. Intensité variable de 370 à 270 ampères. Durée du court circuit environ $^{1}/_{10}$ de seconde.

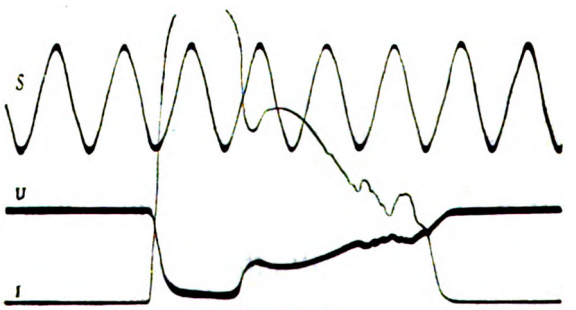


Planche 4.

Planche 4. — *Court circuit* sous 220 volts.

Même essai que le précédent, mais les accumulateurs venaient d'être chargés.

La courbe d'intensité sort des limites de la pellicule.

L'intensité, calculée d'après la chute de tension du réseau, a dû atteindre environ 700 ampères.

Durée du court circuit environ $^{1}/_{10}$ de seconde.

La courbe oscillographique présente des sinuosités dues, probablement, au courant d'air produit par la déflagration.

Digitized by Google

Planche 5. — *Court circuit* sur *courant alternatif* fourni par le Secteur de la Rive gauche, fréquence 42, tension 115 volts.

Puissance du transformateur 120 volts, 100 ampères.

L'intensité du courant avait été *limitée*, à peu près, à 100 ampères efficaces, en réglant la charge par des lampes à incandescence à filament de carbone.

Intensité au début du court circuit environ 115 ampères maximum.

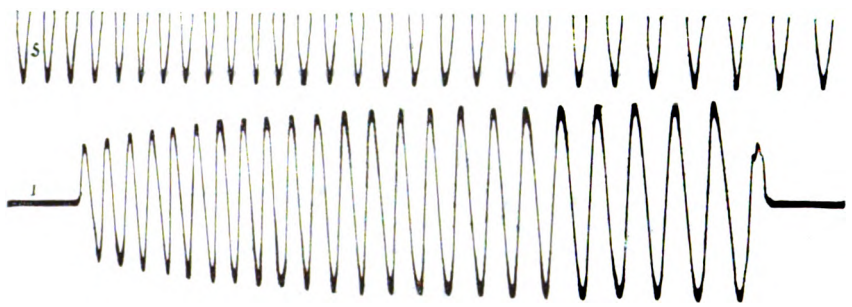


Planche 5.

Intensité à la fin du court circuit environ 185 ampères maximum.

Durée du court circuit environ $^{6}/_{10}$ de seconde.

Cette courbe montre le temps nécessaire pour que l'intensité du courant passant dans les lampes à incandescence atteigne son régime. L'intensité croît parce que la résistance électrique du carbone décroît avec la température.

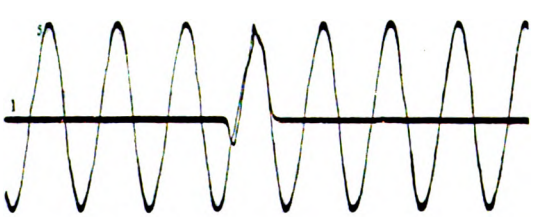


Planche 6.

Planche 6. — *Court circuit* sous 115 volts *sans résistance de protection.*

Courant alternatif fourni par le Secteur de la Rive gauche. Fréquence 42.

Puissance du transformateur 100 ampères, 120 volts.

Digitized by Google

Intensité pendant le court circuit environ 1000 ampères maximum.

Durée du court circuit $^1/_{60}$ de seconde environ.

On peut voir sur la courbe une légère déformation de la courbe du Secteur.

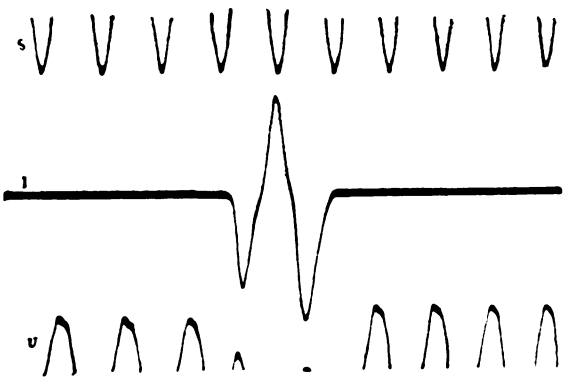


Planche 7.

Planche 7. — *Court circuit* sur courant alternatif, fréquence 42 *sans résistance de protection.*

Le courant était fourni par un groupe composé d'un moteur à courant continu (15 Kw.) accouplé rigidement à un alternateur (6 Kw.).

Intensité pendant le court circuit environ 470 ampères maximum.

Durée du court circuit environ $^4/_{100}$ de seconde.

La courbe U montre la chute de tension produite par la réaction d'induit de l'alternateur et par la variation de vitesse du groupe.

La comparaison de la courbe S (Secteur) avec la courbe U montre un ralentissement, très net, de la vitesse du groupe.

Les deux derniers essais montrent, encore, les influences de la ligne et des sources d'énergie ; dans le dernier cas, le groupe était alimenté par une de nos batteries d'accumulateurs soutenue avec le courant produit par une dynamo (10 Kw) actionnée par un moteur à gaz de 15 Kw ; tandis que dans l'essai précédent le transformateur avait derrière lui l'énorme puissance du secteur de la Rive gauche.

Ces épreuves de court circuit ont eu, bien entendu, une action néfaste sur les indications des compteurs.

Digitized by Google

Après les 3 premières épreuves (pl. 2, 3, 4) le compteur moteur à courant continu (220 volts, 10 ampères) avait une marche à vide correspondant à une puissance de 130 watts.

Ce compteur était muni d'un écran magnétique.

Après les 3 dernières épreuves (pl. 5, 6, 7) le compteur d'induction avançait à moitié charge de 30 pour cent.

C'est pour éviter un essai aussi brutal que le règlement français a demandé de limiter l'intensité du courant passant dans le court circuit à 10 fois l'intensité maximum du compteur; cette restriction, à mon avis, est regrettable, car un court circuit plus franc aurait mieux renseigné, nous venons de le voir, sur la construction mécanique de l'appareil et sur la valeur de l'aimant.

L'action des courts circuits est démagnétisante.

Pour éviter ces actions (qui produisent fréquemment 2 % dans les conditions du règlement français), il faudra éloigner, le plus possible, l'aimant du circuit inducteur et le munir d'un écran magnétique convenable.

L'écran protecteur, employé généralement, est insuffisant; il a des dimensions trop exiguës et, même souvent, il est plus nuisible qu'utile, parce que, restant aimanté, il vient agir sur la bobine mobile en créant un nouveau champ parasite.

La place de l'aimant, eu égard à la position des lignes de forces émanant de l'inducteur, est importante; l'aimant, dont les côtés seront dans le sens de ces lignes, aura tendance à se desaimanter, tandis qu'au contraire l'effet sera minime dans la position perpendiculaire.

Le traitement et la forme de l'aimant ont également une grande importance pour la conservation du magnétisme.

Les compteurs munis de petits aimants amortisseurs avancent de 10 et 20 % après quelque temps de service.

Compteurs pendulaires. — Ces compteurs, sans amortisseur, auront donc l'avantage sur les autres de n'avoir pas cette cause d'erreur.

Compteurs d'induction. — L'action mécanique ne se fera pas sentir sur les compteurs d'induction, car leurs bobines séries sont enroulées sur des tôles.

Le champ dispersif est, aussi, infiniment moindre; dans ces conditions, il sera facile d'avoir des appareils chez lesquels l'erreur ne variera pas plus de 1 % avant et après l'épreuve

Digitized by Google

de courts circuits limités à 10 fois le courant maximum du compteur.

Malgré cela j'ai constaté, plusieurs fois, une influence dépassant les tolérances françaises.

Ampèreheuremètres à collecteur. — Outre l'action possible sur l'aimant, les courts circuits altèrent les surfaces des balais et du collecteur, et même produisent la soudure des lames; car, au moment du court circuit, il passe dans l'induit un courant très élevé, ce qui tient d'une part à l'élévation de la tension aux bornes du shunt, et d'autre part (si le compteur est arrêté) à l'absence de la force contre-électromotrice. Il en résulte des retards qui peuvent être très importants.

Ampèreheuremètres moteurs à mercure. — Les courts circuits agissent sur l'aimant et sur le mercure qui peut être chassé de son récipient; ce dernier accident produit l'arrêt du compteur.

6. — Emploi de shunts.

L'emploi des shunts simplifierait beaucoup la mesure de l'énergie en permettant d'éloigner les compteurs des champs parasites et de n'avoir que des modèles de petit calibre plus faciles à construire; mais, les enroulements série des compteurs wattheuremètres ont une résistance si faible que le rapport des résistances du shunt et de l'ensemble des enroulements série (y compris les cordons) est difficile à maintenir constant.

Les shunts sont, en général, en alliage sans coefficient de température (manganin), tandis que les enroulements du compteur sont en cuivre, d'où coefficient de variation de $^4/_{1000}$ par degré.

Il importe de remarquer que, si l'on veut restreindre l'erreur à l'action seule de la température ambiante, il faudra donner à l'enroulement des compteurs sans amortisseur, une grande section, ce qui aura pour effet d'éliminer les échauffements dans ces bobinages.

L'augmentation de température cause, cette fois, un retard dans les indications. Elle permettra, donc, de compenser en partie l'avance produite, dans les compteurs munis d'amortisseurs, par l'échauffement de l'air de la cage.

Les shunts ne pourront pas être employés en courants alternatifs, sauf toutefois s'ils possèdent la même constante de temps que celle des enroulements du compteur.

Une cause banale d'erreurs dans l'emploi des shunts est la

Digitized by Google

résistance ohmique supplémentaire des cordons, résistance provenant du desserrage des attaches, du changement de résistance des cordons et enfin, souvent, de la rupture lente des brins de cuivre constituant le fil.

7. — MARCHE À VIDE.

Compteurs wattheuremètres à collecteurs. — Elle est produite par les trépidations, les variations de tension, par l'orientation des compteurs dans le champ terrestre, ainsi que par les autres influences magnétiques extérieures; elle peut se produire, aussi, sous l'influence des courts circuits qui donnent une polarité à certains écrans magnétiques. Le couple amortisseur est, alors, insuffisant pour résister à ce champ supplémentaire.

Les faibles marches à vide de ces compteurs sont, le plus souvent, empêchées par des pastilles magnétiques placées sur le disque; ces pastilles s'arrêtent sous l'aimant.

Compteurs pendulaires Aron. — Ces compteurs ont leurs indications indépendantes des influences électriques signalées ci-dessus.

La marche à vide dépend de la construction mécanique de ces mouvements d'horlogerie; elle provient du mauvais entraînement de l'équipage satellite, et le plus souvent de la variation de la periode d'une des pendules (par desserrage d'une lame de ressort auxiliaire).

Ces marches à vide sont alors fantastiques, ou si elles se produisent irrégulièrement, elles pourront passer inaperçues pendant un certain temps.

J'ai eu l'occasion, notamment, de vérifier un compteur Aron, dont les indications semblaient exagérées. Ce compteur que *j'ai trouvé* dans les limites d'exactitude et qui n'avait pas eu de marche à vide sensible pendant le temps de ma présence, a enregistré, au contraire, un nombre respectable de k. w. h., la nuit suivante, alors que, pour examiner sa marche à vide, sur une durée plus longue, j'avais fait interrompre tout débit dans l'installation.

Compteurs d'induction. — La marche à vide est empêchée par l'emploi d'une paillette magnétique s'arrêtant sous l'aimant. Quelquefois, aussi, des fentes ou trous percés dans le disque suffisent pour arrêter le mouvement lors de leur passage sous l'électro de tension.

Digitized by Google

8. — Fréquence et forme de l'onde.

Compteurs à collecteurs et compteurs pendulaires. — Les changements de fréquence et d'harmoniques agissent sur les compteurs en faisant varier le décalage du courant dérivé par rapport à la tension aux bornes.

Ce décalage dépend de la constante de temps $\frac{L}{R}$ du circuit dérivé; il faudra donc rendre ce rapport le plus faible possible, ce qui sera d'autant plus aisé que la tension du réseau sera plus grande.

On peut, du reste, corriger, en partie, cette action par le dispositif Frager (bague en court circuit).

Les compteurs à collecteurs sont de moins en moins employés pour les courants alternatifs; leurs prix élevés, l'entretien onéreux, la dépense d'excitation font préférer les compteurs d'induction; cependant, comme ces derniers peuvent mal enregistrer les variations de puissance provenant des harmoniques et ont, de plus, une mauvaise courbe d'étalonnement dans les fortes charges, il est possible que dans l'avenir on revienne à l'emploi des compteurs à collecteurs.

Les compteurs pendulaires Aron sont surtout en usage dans les stations importantes où la question de prix du compteur n'intervient pas.

Compteurs d'induction. — Les variations de la fréquence normale du réseau ont une influence faible sur les compteurs bien conditionnés; l'erreur à demi-charge est cependant quelquefois de 1 a 2 % pour des écarts de $\pm$ 5 % sur la fréquence normale.

Ces essais avec des écarts de $\pm$ 5 % sont insuffisants pour les réseaux hydrauliques dont la vitesse est plus irrégulière.

La variation de forme de l'onde, variation dûe aux génératrices employées et aux conditions de résonance des harmoniques du réseau, peut produire des différences considérables dans les indications des compteurs d'induction. J'ai connaissance d'un réseau sur lequel les compteurs vérifiés à une certaine heure étaient exacts tandis que les erreurs atteignaient 15 % à une autre heure (le réseau étant alors alimenté par un alternateur différent). Les courbes relevées à l'oscillographe ont montré de grandes différences dans les harmoniques et la présence en particulier des harmoniques 11 et 13.

Digitized by Google

Cette influence des harmoniques est difficile à étudier dans les laboratoires avec les groupes d'étalonnement dont on dispose actuellement. Ces groupes de faible puissance, construits dans le but d'éviter la dépense d'une énergie considérable, permettent d'alimenter les circuits série avec une machine, tandis que les circuits de tension du compteur sont alimentés par un autre alternateur monté sur le même arbre. Le décalage entre les deux courants est, alors, produit en faisant varier la position de l'inducteur d'une machine.

Il n'est pas exact, dans ces conditions, d'étudier l'influence des harmoniques en les créant, comme cela a été fait, sur une seule des deux machines, car la puissance résulte, uniquement, de l'action des harmoniques du même ordre de l'intensité et la force électromotrice (1).

Il faudra donc faire ces essais avec un seul alternateur dont on ferait varier la courbe en ajoutant la force électromotrice d'un autre alternateur (de période voulue) accouplé *rigidement* avec lui; ou bien encore faire résoner les harmoniques du réseau par l'emploi de capacité et de self.

D'après M. Iliovici (2), pour que la fréquence ait peu d'influence il faut des compteurs d'induction ayant: les champs alternatifs faibles devant le champ de l'aimant; la résistance de la bobine " volts „ faible devant sa réactance et la résistance du disque grande devant sa réactance, ce qui amène à mettre un grand entrefer.

9. — Influence des décalages.

Compteurs moteurs et pendulaires. — L'exactitude de ces compteurs dépendra de la constante de temps de leur circuit dérivé et du décalage du réseau.

Les compteurs du type Thomson (3), pour un facteur de puissance 0,4 dans le réseau, ont une avance qui peut dépasser 4 %

(1) M. Janet, *Électrotechnique générale*, tome II, p. 129, 2me édition.

(2) Iliovici, *Sur les théories des compteurs d'induction à disque* (" Éclairage électrique „, 18 février 1911).

(3) P. Janet, *Les compteurs à l'Exposition de 1900* (" Bulletin de la Société internationale des Électriciens „, février 1901, p. 73).

Digitized by Google

avec un décalage arrière; l'erreur est de sens contraire pour le décalage avant.

Cette action est corrigée en partie par les dispositifs Frager (spire de cuivre fermée en court circuit et placée dans l'intérieur de la bobine inductrice principale ou résistance sans self placée en dérivation aux bornes de l'inducteur); on peut, aussi, pour y remédier, donner une faible capacité à l'enroulement dérivé, mais, dans ce cas, il faut craindre, dans cet enroulement, les résonances d'harmoniques qui, par conséquent, fausseront les mesures.

Malgré ces dispositifs, les indications, dans le cas où le décalage du réseau est très grand, peuvent être affectées d'erreurs notables.

Sur les réseaux monophasés, où les facteurs de puissance inférieurs à 0,5 ne se produisent que pendant le temps relativement court de démarrage des moteurs, il semblerait inutile de faire les essais jusqu'à la valeur 0,2, comme cela est demandé par certaines règlementations; ces essais sont, cependant, à faire pour les compteurs triphasés, chez lesquels on vérifie souvent les enroulements séparément; on sait en effet, que, dans la mesure d'une puissance triphasée par la méthode dite des 2 wattmètres, il existe, du fait du montage, un décalage supplémentaire de $\pm$ 30° selon la phase, de sorte que, pour le facteur de puissance 0,7 dans le réseau un des circuits du compteur aura un facteur de puissance 0,25, tandis que l'autre sera de 0,96.

Il ne faut pas, toutefois, en exagérer les conséquences, car la plus ou moins grande exactitude de l'énergie mesurée par le wattmètre, où le facteur de puissance est faible, aura une importance minime sur la valeur totale de l'énergie à mesurer.

Compteurs d'inductions. — L'influence du décalage est compensée très facilement par différents procédés et cette compensation est suffisante pour les décalages usuels.

10. — Transformateurs.

Nous avons vu quelles étaient les nombreuses causes d'erreur propres aux compteurs branchés directement; l'emploi des transformateurs va compliquer, encore, la question par les décalages supplémentaires introduits entre les courants primaires et secondaires. Ces différences de phase peuvent passer de 0,1 à 10

Digitized by Google

degrés selon la charge et la puissance des transformateurs (1); elles modifieront, pour le compteur, le décalage du réseau.

Les erreurs des compteurs montés sur transformateurs dépendront, ainsi, du décalage du réseau, des fuites magnétiques du transformateur, de la fréquence (harmoniques), de l'impédance des circuits ainsi que de l'hystérésis et des courants de Foucault provenant des tôles.

Le rapport de transformation étant variable avec la *nature* et le *nombre* d'appareils alimentés par le transformateur, il est *indispensable* de faire les essais du compteur avec ses transformateurs et avec le montage tel qu'il sera réalisé dans l'installation.

Pour avoir un rapport de transformation constant, les transformateurs doivent être construits avec d'excellentes tôles minces, avoir une réluctance faible, être dépourvus de fuites magnétiques et travailler sous une induction faible (2000 à 3000 gauss); ils seront donc *lourds* et *sans joints*.

Ces conditions peuvent être réalisées facilement avec les anneaux de tôles circulaires que nous employons (2) au Laboratoire Central d'Électricité. Ces anneaux, sur lesquels les enroulements peuvent être faits d'une façon absolument régulière, sont maintenant adoptés par différents constructeurs et devraient être d'un emploi plus général.

Transformateurs de tension. — Ces appareils sont toujours en service (aux variations de tension près) avec le même champ; ils travailleront, par conséquent, avec la même induction et n'offriront de difficultés de construction que pour leur isolement (bobines entre elles et par rapport à la masse).

Pour donner une idée de l'ordre de grandeur des erreurs provenant des transformateurs de tension, un constructeur indique, sur son catalogue, un retard variable de 1 à 5 % entre $\cos \Phi = 1$ et $\cos \Phi = 0{,}2$; ces nombres s'appliquent au cas où le transformateur débite sur un ensemble composé du compteur, de voltmètre ordinaire et enregistreur; l'écart ne serait plus que de 2 % entre $\cos \Phi = 1$ et $\cos \Phi = 0{,}6$.

Transformateurs d'intensité. — Les transformateurs d'intensité,

---

(1) " Drysdale Electrician ", 16 nov. 1906.

(2) JANET et ILIOVICI (" Bulletin de la Société internationale des Électriciens ", février 1903).

Digitized by Google

au contraire, travaillent à chaque instant avec une induction variable; les erreurs dépendront, surtout, du décalage du réseau et de la charge du secondaire du transformateur (compteurs, ampèremètres, wattmètres).

En général, pour les charges élevées, l'erreur indiquée par les fabricants est de l'ordre de $\pm$ 1 %, tandis qu'à partir du dixième de la charge (en ampères) aucune garantie n'est *donnée*.

Le constructeur, dont nous avons parlé au sujet des transformateurs de tension, indique pour le point $\frac{1}{10}$ de la charge (en ampères) une erreur relative passant de 2 pour cent de retard à 5 pour cent d'avance selon la valeur du décalage du réseau (de $\cos \Phi = 1$ à $\cos \Phi = 0{,}4$); les erreurs pourront être diminuées dans les réseaux monophasés en faisant le réglage pour le décalage moyen du réseau ($\cos \Phi = 0{,}8$); mais il n'en sera pas de même pour les compteurs triphasés chez lesquels cette action viendra modifier le décalage (dans le compteur) de chacune des phases et s'ajoutera à l'erreur propre du compteur.

L'avance sera un peu compensée, au point bas, par le compoundage et par le retard dû au transformateur de tension.

Ceci montre, de nouveau, qu'il est nécessaire d'étalonner l'ensemble des transformateurs et du compteur muni de ses appareils accessoires.

11. — Courants de Foucault.

Ces courants ne se manifestent que sur les compteurs de gros calibre marchant sans shunt et sans transformateur.

Les erreurs très importantes (10-20 %) fausseront complètement, sur courant alternatif, l'étalonnement des compteurs wattheuremètres qui aurait été fait sur courant continu.

Ces actions sont amoindries par le lamellage des enroulements et par les coupures faites, dans la direction convenable, sur les supports ou parties métalliques voisines des enroulements.

J'ai rappelé ces erreurs, car je sais que, *malgré l'avis des constructeurs*, des clients n'ont pas hésité à faire acquisition de compteurs chez lesquels ces actions n'étaient pas corrigées.

12. — Pose de compteurs.

Les montages défectueux peuvent provenir de causes mécaniques ou électriques.

Digitized by Google

Causes mécaniques. — Elles introduisent des frottements supplémentaires n'agissant que sur les faibles régimes du compteur. Ainsi, par exemple, dans un modèle *extrêmement répandu*, on peut produire, en serrant plus ou moins l'unique vis de fermeture de la cage, une légère déformation du bâtis, déformation suffisante pour arrêter le compteur, à volonté.

La verticalité du système mobile est, aussi, excessivement importante.

Les compteurs dont le disque amortisseur (en cuivre) est en haut, auront, par suite des frottements de l'axe sur le support supérieur, leurs indications faussées de plusieurs pour cent au dixième de la charge maximum. Cette verticalité est délicate à obtenir dans les compteurs du type Thomson, dont le circuit mobile est forcément lourd.

Certains constructeurs munissent leurs appareils de fil à plomb; mais ce dispositif peut parfaitement n'être pas suffisant, car il exige une construction parfaite.

Causes électriques. — On peut signaler pour les compteurs à courant continu, l'inversion de polarité des câbles amenant le courant au compteur; cette inversion qui, si elle est faite sur les deux conducteurs, ne change pas le sens de rotation du système mobile, produira des erreurs dues à la nouvelle orientation du champ magnétique de l'inducteur; cette action peut faire 10 % aux faibles charges.

Je rappelle aussi, que dans les compteurs d'énergie à plusieurs fils, l'énergie n'est pas mesurée correctement en branchant sur *un seul pont* le circuit dérivation.

Dans les compteurs triphasés le branchement des phases a une action qui atteint, aussi, 3 à 10 pour cent (au dixième de charge); cette action sera souvent différente pour les compteurs construits sur le même modèle; aussi certains constructeurs indiquent-ils le sens de rotation du champ tournant dans le compteur.

Compteurs spéciaux.

Compteurs à charge complexe, à dépassement, etc. — Les erreurs signalées se produiront dans les compteurs spéciaux qui ne sont que des compteurs ordinaires adaptés à l'enregistrement auquel ils sont destinés (double tarif, à prépaiement).

Compteurs à dépassement. — Ces compteurs dont l'usage est de

Digitized by Google

plus fréquent, méritent d'être examinés, car ils commencent à donner lieu à des litiges.

Destinés à mesurer l'énergie dépassant une certaine puissance fixée par un forfait, ils sont basés sur le principe suivant: Un couple antagoniste empêche le compteur de fonctionner tant que la puissance forfaitaire n'est pas atteinte.

De la réalisation de ce couple antagoniste dépend la bonne marche du compteur.

Ce couple peut être produit par des moyens mécaniques (ressort tendant à faire marcher à l'envers le mobile du compteur), ou bien, par des procédés électriques (moteurs inverses mis sur la tension ou l'intensité).

Ces procédés ont l'inconvénient de rendre possible la marche arrière qu'il faut arrêter par des cliquets; de plus dans les dispositifs électriques la variation de la tension ou de l'intensité modifient la constance du point de dépassement.

Une autre solution est employée par la C.ie pour la fabrication des compteurs (de Paris); elle consiste à utiliser la constance du couple d'hystérésis agissant sur une petite masse de nickel tournant entre les pôles d'un aimant.

Ce dispositif n'aura pas de marche arrière et ne sera pas influencé par les variations de la tension ou de l'intensité du courant.

Quelles *tolérances* doit-on admettre pour ces compteurs à dépassement? La question est délicate à résoudre, car les points à moitié charge d'un compteur peuvent avoir (d'après le règlement français) $\pm 3\ \%$ d'erreur.

D'autre part ces compteurs sont établis pour des charges excédant, souvent bien peu, le point de dépassement.

L'erreur relative devra-t-elle être évaluée d'après l'énergie totale utilisée, ou d'après celle dépassant le forfait? Dans ce dernier cas, l'erreur relative me semble indéterminable, puisqu'elle dépendra de l'incertitude du point de dépassement et de la marche défectueuse d'un compteur au voisinage du démarrage.

A mon avis, il faudrait se rapporter à la puissance totale et décider que ces compteurs à dépassement ne seraient établis que pour des fractions du forfait bien déterminées (par exemple 1,20 P, 1,50 P).

Des tolérances spéciales seraient, ensuite, appliquées pour chacune de ces catégories.

Digitized by Google

Les essais porteraient sur les points 1,05 P, 1,10 P, 1,20 P et 1,50 P ; ainsi un compteur de puissance totale 12.000 watts (point de dépassement 10.000 watts) serait essayé à 10.500, 11.000 et 12.000 watts.

Compteurs à charge complexe. — La charge complexe définie par M. le Professeur Riccardo Arnò [1] sera, sans doute, examinée dans un autre rapport du Congrès.

Les compteurs destinés à ces mesures sont encore trop récents pour qu'il soit possible de se rendre compte de l'approximation avec laquelle sera évalué ce nouveau mode de tarification.

Compteurs électrolytiques.

Ces ampèreheuremètres, usités surtout en Angleterre, ont l'avantage d'avoir des indications, théoriquement, exactes quelle que soit la charge.

Les variations de température produisent souvent dans l'électrolyte, des cristallisations ainsi que des variations de résistance.

Les indications du compteur auront, alors, des erreurs qui pourront être très importantes à cause du shunt dont sont munis ces compteurs.

La vérification de ces appareils sera longue, sans toutefois avoir la précision à laquelle on pourrait s'attendre.

La fragilité et le manque de contrôle des indications ont également des inconvénients graves.

Courbe d'étalonnement des compteurs. Démarrages.

Ayant examiné les différentes causes d'erreur, nous pourrons maintenant discuter les formes des courbes d'étalonnement des compteurs.

Compteurs à courant continu. — La courbe représentative de l'erreur relative en fonction de la charge sera sensiblement une

---

[1] RICCARDO ARNÒ : Congresso in Brescia, 29 settembre 1909 ; Sezione di Milano, 3 dicembre 1909 e 19 aprile 1910 ; Sezione di Torino, 28 maggio 1910.

Digitized by Google

droite de la pleine charge au dixième de charge, mais à partir de ce point l'erreur peut devenir positive ou négative selon l'action prépondérante du frottement ou du compoundage. L'inclinaison de cette droite sera fonction de la température interne.

Compteurs d'induction. — Pour ces compteurs, au contraire, il n'est pas rare de trouver les erreurs relatives passant d'un retard de 3 % à la pleine charge à une avance de 2 % à la demi-charge, l'écart le plus fréquent étant généralement de 2 % entre ces deux points ; le sens de l'erreur, au point bas, dépend du compoundage.

Compteurs pendulaires. — Ces compteurs exacts théoriquement, ont aussi une courbe d'étalonnement dépendant des frottements des axes et surtout du compoundage arrière destiné à empêcher les légères marches à vide.

DÉMARRAGES. — Le démarrage des compteurs *Wattheuremètres à collecteurs* est obtenu pour $\frac{1}{100}$ de la charge maximum à condition que le compteur vienne d'être remis en état et que les balais ne soient pas trop serrés.

Il existe des dispositifs (balais vibrants) qui permettent un démarrage aux $\frac{5}{1000}$; ce dispositif est surtout intéressant pour les compteurs de gros calibres.

Le démarrage des *ampèreheuremètres freinés* est voisin du $\frac{1}{100}$ de l'intensité maximum ; tandis que pour les ampèreheuremètres non freinés on peut arriver à $\frac{5}{1000}$ et même $\frac{2}{1000}$.

Les compteurs pendulaires Aron sans compoundage arrière sont plus sensibles.

Quand ils sont en bon état, les modèles à grands et petits balanciers démarrent, sûrement, pour $\frac{1}{1000}$ de la charge maximum.

II.

Essais en ville.

Les essais sur place sont malheureusement nécessités par la marche défectueuse des compteurs après un certain temps de

Digitized by Google

service. Cette marche sera d'autant plus mauvaise que l'entretien aura été moindre.

Il est certain que la moitié au moins des compteurs à balais ont leurs indications trop faibles pour les points bas; dans les fortes charges, le nombre de compteurs retardants sera, aussi, beaucoup plus élevé que celui des compteurs avançants.

Les vérifications faites en ville sont certainement plus douteuses que celles effectuées au Laboratoire.

Les appareils de contrôle, les méthodes employées auront, d'une part, une précision moindre et, d'autre part, la constance de la charge sera, le plus souvent, impossible à maintenir; dans ces conditions, les tolérances sur les erreurs devront être augmentées.

En Allemagne les limites sont, généralement, doublées, de sorte qu'un compteur au dixième de sa charge, peut avoir 12 % d'erreur.

A Paris, la *tolérance municipale*, pour les compteurs en service, est $\pm$ 5 % jusqu'au dixième de charge et $\pm$ 10 % au vingtième.

Un cas important est celui de l'enregistrement par le compteur de charges rapidement variables (tramways etc.); la vérification d'un compteur placé sur un tel circuit peut être faite par un procédé grossier consistant à faire des lectures aux appareils de contrôle à des intervalles de temps très rapprochés (toutes les 5 ou 10 secondes); ou bien en plaçant en série avec l'appareil un compteur d'un principe différent, compteur préalablement étalonné au Laboratoire: on peut, alors, se demander si les indications de ce compteur seront aussi exactes en courant variable.

M. FRAGER (1) a montré *en 1893* que, théoriquement, les compteurs moteurs devaient bien enregistrer les charges variables. M. FABRY (2) arrive aux mêmes conclusions. MM. ORLICH et GUENTHER-SCHULZE (3) ont repris la question théoriquement, et vérifié, par une méthode électrolytique, que les différences entre les indications des compteurs moteurs, oscillants et pen-

(1) *Intégration d'une puissance variable par le compteur Thomson* (" Industrie électrique „, 10 mars 1893, p. 102).

(2) Congrès International d'électricité de Marseille, 1908, tome II, p. 608.

(3) " Electrotechnik und Maschinenbau „, Wien, 29 August 1909, p. 80.

Digitized by Google

dulaires étaient négligeables et de l'ordre des erreurs d'expérience (1).

Personnellement (en 1903) j'étais arrivé au même résultat en vérifiant au Laboratoire un compteur placé en ville sur une installation à courant continu, installation sur laquelle la charge était très variable. L'étalonnement avait été fait sur place par des lectures toutes les 5 secondes; j'avais crù devoir recommencer les essais sur courant constant.

Il est, cependant, certain que plusieurs observateurs ont trouvé des différences dans les indications d'appareils mis en série; cela tient, sans doute, aux causes d'erreurs signalées (température, champs extérieurs etc., mais cela peut provenir, aussi, de la courbe d'étalonnement. Dans le cas, par exemple, où un compteur d'induction et un compteur à collecteurs seraient mis en série sur le même circuit d'utilisation, les indications du premier pourraient diminuer de 4 % entre la demi-charge et la pleine charge, tandis que celles du second augmenteraient de la même quantité. La différence entre les indications serait donc de 8 %.

J'ai cité cet exemple pour rappeler l'influence de l'echauffement d'un compteur par le passage prolongé du courant.

Il est évident que dans les usines de compteurs, dans les laboratoires de contrôle, les réglages des compteurs seraient impossibles à faire rapidement si on voulait les effectuer sur les compteurs munis de leurs cages; il faudra donc tenir compte de cette action dans les étalonnements à cage ouverte, tant que la compensation de température ne sera pas mieux établie.

III.

Appareils de contrôle.

Avant de conclure, je voudrais indiquer en quelques mots la précision que nous pouvons espérer des appareils de contrôle.

(1) La question des variations de charge dans les compteurs d'induction vient d'être étudiée tout récemment par M. K. Schmiedel; la conclusion de ce travail est que les compteurs ont tendance à avancer à charge variable, mais que ces erreurs sont pratiquement négligeables (" Electrotechnik und Maschinenbau ,, Wien, 2 Juli 1911, p. 555).

Digitized by Google

COURANT CONTINU.

Wattmètres. — L'usage des wattmètres n'est pas à recommander à cause des influences magnétiques extérieures (champ terrestre, dynamos); toutefois quelques secteurs emploient, encore, des appareils à torsion permettant d'orienter le wattmètre dans une direction telle que le champ terrestre soit annulé. Ces instruments, non amortis, ne permettent pas de faire des lectures rapides; aussi ne doit-on les prendre que sur charge constante.

Les wattmètres non astatiques, à lecture directe, sont inutilisables en courant continu; car il faudrait pouvoir faire des lectures en inversant les courants dans les enroulements (pour éliminer l'action terrestre).

Appareils à cadre mobile. — Les appareils à aimant et cadre mobile sont les plus employés, mais, ainsi que je l'ai dit au Congrès de Marseille (1), ils ont leurs indications faussées par les variations de la température, par les couples thermo-électriques, le champ terrestre, la viscosité des ressorts, etc.; il faut, donc, prendre bien des précautions pour que les indications de ces appareils soient exactes à 1 % pour le point aux $\frac{8}{10}$ de la graduation maximum.

Dans les laboratoires, on dispose de potentiomètres permettant de faire des mesures d'intensité à $\frac{2}{1000}$ près (l'erreur provenant surtout de la valeur absolue de la résistance sur laquelle est branché le potentiomètre).

COURANT ALTERNATIF.

Les essais ne peuvent être faits en mesurant la tension et l'intensité (à cause du décalage); il faut employer ou des méthodes spéciales (méthodes des 2 voltmètres, 2 ampèremètres, etc.) ou des wattmètres.

Les indications des wattmètres seront, comme celles des comp-

(1) Congrès des applications d'électricité, Marseille, 1908, tome II, p. 627.

Digitized by Google

teurs, influencées par les décalages des courants, et les décalages supplémentaires provenant des transformateurs de mesure.

Ces influences, toutefois, sont minimes dans les appareils bien construits.

On trouve, maintenant, d'excellents wattmètres à lecture directe pour lesquels l'erreur ne dépasse pas $\frac{5}{1000}$ aux $\frac{8}{10}$ de la charge maximum; mais ces appareils sont munis de dispositifs permettant de faire varier la sensibilité par la mise en parallèle des bobines fixes, dispositifs qui peuvent devenir dangereux pour la précision de la mesure quand le contact n'est pas bien assuré.

Mesure du temps.

Enfin, quand l'essai d'un compteur dure 60 secondes, la mesure du temps n'est pas faite avec une assez grande précision. Le départ ou l'arrêt du chronomètre peut permettre chaque fois une erreur de $\frac{2}{10}$ de seconde, c'est-à-dire de $\frac{3}{1000}$ sur la durée.

Résultats d'essais d'approbation officielle.

Les indications des compteurs rentrent-elles facilement dans les limites?

Ces limites sont-elles trop larges?

J'ai trouvé, pour ma part, que parmi tous les types de compteurs essayés au Laboratoire Central d'Électricité, en vue de l'approbation ministérielle, 14,3 % des compteurs wattheuremètres à collecteurs, 40 % des ampèreheuremètres à collecteurs et 47 % des compteurs d'induction avaient satisfait, d'emblée, aux conditions du programme.

Les autres ont dû être réglés sur place, subir des modifications dans les bobinages, changer d'amortisseurs, d'aimant, avant d'être dans les limites prévues.

On voit par ces résultats, obtenus sur des compteurs neufs dont l'étalonnement avait dû être soigné par les constructeurs, que les limites françaises actuelles ne pourront pas être réduites tant que la construction des compteurs ne sera pas plus parfaite.

Digitized by Google

Conclusions.

A une époque où le prix de vente de l'énergie électrique devient si peu rémunérateur, et où par conséquent les bénéfices des secteurs sont très amoindris, les erreurs mêmes de 2 ou 3 %, sur les indications des compteurs, peuvent avoir une grande importance financière; aussi, les secteurs devraient-ils demander des appareils bien soignés, et renoncer à ces modèles trop petits chez lesquels les différents organes, forcément trop ramassés, s'influencent réciproquement.

La construction de bons compteurs ne présente aucune difficulté, il faut seulement augmenter les couples par les ampères tours, la section des enroulements pour éviter les échauffements exagérés, supprimer ou atténuer l'action de la température par l'emploi de matériaux sans coefficient de température, et avoir des boîtes de fermeture solides, parfaitement étanches pour éviter les poussières et l'humidité.

Ces conditions amènent à une augmentation de *poids*, de *volume* et *surtout de prix*. Cette question de prix est la seule qui ne devrait pas intervenir, car le plus souvent les compteurs sont placés, en location, à un tarif très avantageux: à Paris, par exemple, le tarif est de 6 francs par an pour un compteur dont le prix peut être de 30 francs.

Je m'adresse, maintenant, aux Laboratoires de contrôle, et je leur demanderai de renoncer à indiquer les erreurs au $\frac{1}{1000}$ et même au $\frac{1}{10000}$, comme le montrent les certificats reproduits dans des catalogues.

Nos méthodes de mesure, *d'abord*, et *surtout* les indications des compteurs, ne peuvent avoir une telle précision.

Les résultats d'essais de compteur, en vue de l'approbation française, sont donnés par le Laboratoire Central d'Électricité à $\pm \frac{5}{1000}$; c'est, actuellement, le seul degré d'approximation auquel on puisse prétendre avec des essais particulièrement soignés.

Digitized by Google

Enfin, les résultats de ces essais pour l'approbation ministérielle montrent l'*inutilité* de ces épreuves, si elles ne sont suivies d'une réception individuelle des compteurs.

Cette réception, qui existe dans certains pays et dans plusieurs villes, conduirait, par sa généralisation, à l'amélioration rapide de la construction et de la marche des compteurs et poserait la question, si controversée jusqu'ici, du timbrage.

Digitized by Google

ELECTRICITY METERS

with Special Reference to Different Kinds of Loads.

Rapporto sul Tema N. 18 del Congresso.

Relatore M. CLAYTON H. SHARP (New York).

Inasmuch as the views and opinions of a writer on a subject such as has been assigned in this case must necessarily be largely influenced by the engineering practice with which he is most familiar, it has seemed best to treat the topic frankly from a national rather than international point of view. The writer believes that, by presenting an outline of American meter practice, he can bring before this Congress the resultant of the opinions of many competent meter engineers, thereby rendering the treatment of the subject much more valuable than if it were made on a more individualistic basis. The reproach of one-sidedness is removed by the fact, that the subject will be presented from the more distinctively European standpoint by an able French *confrère.*

The trend of American meter practice has been influenced and is influenced by certain important factors, which have

Digitized by Google

tended to differentiate this practice in some respects from that of other countries.

First: the character of the metering apparatus used has been determined to a considerable extent by the product of a few large manufacturing companies, which, protected from outside interference by patent rights and by high import duties, have been able to develop their apparatus according to the best ideas of their engineers without being too much hampered by constant pressure to produce the cheapest types at a sacrifice of efficiency. In many cases the relations between these manufacturing companies and certain electricity supply companies have been of a very special nature, such that the supply companies have found it to be to some extent a commercial necessity, if not a matter of specific contract or company policy, to use exclusively the apparatus of a certain manufacturing company. While it should not be understood that supply companies have been bound absolutely to manufacturing companies, yet the relations indicated have as a rule been sufficiently close to be of no little potency.

Second: the two great electrical Associations, organized to consider commercial as well as technical matters in relation to electricity supply, have been very influential in shaping the meter practice of the country. Each of these Associations, the National Electric Light Association and the Association of Edison Illuminating Companies, maintains a special Committee on Meters. The membership of such Committees is composed of the meter engineers of some of the largest electricity supply companies. The activities of these Committees are manifold. They keep track of the meter situation at all times, investigating, often on a large scale, either in the laboratory or on the service lines of some large operating company, such new apparatus and such new features of meter practice as present themselves from time to time. They also enter into relations of active co-operation with the engineers of the manufacturing companies who are directly concerned in the production of meters and other apparatus. This relationship is of the greatest importance inasmuch as it makes possible a continual exchange of ideas between the manufacturing and operating companies. Subjects of common interest are taken up in friendly discussion and in a scientific rather than a commercial spirit, and confidential information and technical data are freely exchanged, to

Digitized by Google

the great advantage of both, inasmuch as the manufacturing companies thereby become intimately acquainted with operating conditions and with such shortcomings of existing apparatus as develop in practice and are thereby better able to introduce improvements in their product, while the operating companies gain a valuable insight into the problems and conditions of manufacture and the requirements of standardization.

The Meter Committees furnish a clearing house for information on meters and metering which has been gathered as the result of the common experience, and which, through the Associations, is made available to even the smallest of the supply companies. Moreover, it is common practice for the smaller operating companies to turn to the larger operating companies or to the manufacturing companies for their technically trained meter men. In these ways a more general knowledge of the problems of metering and a more general appreciation of the requirements of good practice than otherwise would have existed, have been brought about.

One of the most valuable results achieved has been the recent production of a code of meter practice, brought out jointly by the Committees of the two Associations. This Standard Meter Code, issued under the authority of the Associations, comprises sections on general topics of measurement, etc., on specifications for the acceptability of types of meters and of auxiliary apparatus, on methods of installation, test and maintenance of meters. It is intended as a general guide to meter practice and its provisions are accepted as representing the best practice and the standard maintained by the best companies in the matters of which they treat. In the course of this report frequent reference therefore must be made to this Standard Meter Code.

The general tendency of American meter practice has been to place accuracy of registration before all other considerations. The result of this tendency is that the meters employed are highly developed pieces of apparatus, carefully designed and constructed with a view to permanent accuracy of operation, and furthermore that the performance of these meters in service is watched with the greatest care, tests being made of the accuracy of the meters in position on the consumer's premises at periodic intervals and according to a highly systematized routine. Moreover the results of such tests are in some States subject to the scrutiny of the governmental authorities. For

Digitized by Google

example, the Public Service Commission of the State of New York, Second District, requires that the results of all tests of consumer's meters, whether made on customer's complaint or as periodic tests, be reported.

This policy of aiming primarily at accuracy of registration is, as far as the purely commercial point of view is concerned, dictated by the fact, established by experience, that inaccurate meters are usually slow meters, that revenue lost as a result of slow meters comes out of the gross receipts of the company, and that with none but a very well constructed and well adjusted meter can that very important part of the energy sold which is represented by the light load use, be registered satisfactorily.

However, the further consideration is given due weight that the customers of an electricity supply company are entitled as a matter of justice and equity to have the energy which they purchase metered correctly, and that unjust as a fast meter is to the consumer whose energy is registered by it, a slow meter works also injustice to those whose meters register correctly, involving discrimination against them, as well as resulting in depriving the company of its just revenue. All of these considerations have tended to bring the practice of electric metering on the part of the large supply companies up to a high standard. Consideration will next be given to the general features of American practice, and particularly to the improvements which have been introduced during the last few years.

Direct Current Meters.

American meter practice was built up originally on the basis of the Edison chemical meter, an *ampère* hour meter. The earliest induction meter, the Shallenberger meter, also measured *ampère* hours. The Edison meter, while it enjoyed the advantage of basing its findings on the fundamental law of electrolysis, suffered from the fact that it was inconvenient and troublesome to manipulate and at times inaccurate and that it gave no " readings „ ; that is, the consumer was utterly unable to tell from an inspection of his meter what his use of current had been. When this was superseded, it was by the Thomson watt-hour meter. The change from *ampère*-hour meter to watt-hour

Digitized by Google

meter was not due entirely to the advantages of the watt-hour type as such, but was undoubtedly influenced by some of the other more commercial considerations which have been mentioned at the outset.

At the present time there is a marked tendency for the central stations to reach out for the business of the small consumers, a field which in the past has been left quite largely to the gas companies. The minimum current which a meter in a small installation is required to register accurately has decreased with the introduction of the metallic filament lamps, which also have been a large factor in popularizing electric lighting. While it is true that carbon filament lamps are made of as small current consumption as metallic filament lamps, yet these lamps have not been of such great importance, due to their relatively low candlepower. The problem of the small consumer is a difficult one from the economic side, because the total annual consumption, and consequently the revenue, being small, the fixed charges on a meter, if the latter is an expensive one, may run to a very considerable percentage of the total revenue obtained through it. For use in installations of this character therefore there is a very strong demand for a meter which shall be of low first cost and of low maintenance cost, which has at the same time great reliability in operation and a reasonable degree of accuracy. This condition indicates the possible return to the *ampère*-hour meter in some form which may be found to meet the requirements of the case. The theoretical objection to the *ampère*-hour meter, that on varying voltage its indications are false, would be of relatively little weight with the larger direct current central stations, inasmuch as their pressure regulation is excellent. These stations have for years furnished carbon filament lamps free of charge to their consumers and these lamps have been high efficiency lamps operating at 3.1 watts per candle. It would evidently be economically impracticable to carry out this procedure on any system but those in which the voltage is very carefully regulated.

The *ampère*-hour meter of the electrolytic type, using mercury as anode material, which has in the past not shown itself capable of meeting the exacting requirements of the best practice, may yet be developed into such a form that it will become a factor in the situation; or some form of motor *ampère*-hour meter in which the main current passes through a shunt

Digitized by Google

so that all of the meter elements are of standard size, may be produced, which, unlike those at present available will be considered sufficiently accurate and reliable to supplant the more expensive watt-hour meter in certain classes of installations. At the present time, however, for the purpose of the metering of direct current sold, the watt-hour meter of the Thomson type holds practically universal sway. This type of meter has been greatly refined by improvements which have been introduced of late years and is at the present time an instrument which, apart from its relatively high cost, is fairly satisfactory. In the modern types of this meter the moving element has been greatly reduced in weight, to the great advantage of the permanent accuracy of registration. This has been accomplished by the use of an aluminium instead of a copper disc and by the use of a spherical armature, designed to give the highest torque per unit weight, so that with 25 per cent. less copper there is 35 per cent. more torque. Furthermore the commutator has been greatly reduced in diameter and the pressure of the brushes against the commutator is maintained by gravity instead of by springs, the results of this arrangement being decreased and more constant friction. The decreased weight of the moving element and the decreased friction are accompanied by a decreased loss in the potential windings, while the torque of the meter has not been reduced. The meter therefore has become inherently more reliable, especially on light loads.

A most important improvement has been in the jewel used in the step-bearing. The experience of operating companies has demonstrated clearly the inability of the sapphire to withstand for more than a limited period the grinding and hammering action of the pivot which rests upon it. The results of extensive investigations made not only by the engineers of manufacturing companies but also those of the operating companies showed that the only type of step-jewel which is able to show a permanently satisfactory performance is the diamond. The earliest diamond bearings were flat and required a ring stone to maintain the pivot in place, an arrangement which did not give complete satisfaction. After no little difficulty, however, it was found possible to grind the diamonds in the form of a cup which required no ring stone, and at the present time cupped diamonds jewels are produced by automatic machinery and are used very extensively in direct current meters. The improvement brought

Digitized by Google

about in this way is a very marked one. Where the old sapphire bearing was unreliable and had a usefull life which could not be reckoned as greater than one million revolutions of the disc, the diamond bearing is very reliable and has a usefull life of many millions of revolutions — how many is not as yet known, because insufficient time has elapsed to determine it. Inasmuch as the chief cause of low registration of meters at light loads has been the gradual increase of pivot and jewel friction, due to deterioration of the jewel, this results is of the utmost importance in regard to the accuracy of metering. Moreover, in spite of the much higher cost of the diamond bearing, the expense necessary to maintain this accuracy has also been materially reduced. The gain in accuracy of registration due to the substitution of diamond for sapphire bearings, is illustrated by the data in the following table taken from the operating records of a very large company.

The table contains a discussion of the results of a large number of service tests of commutator meters with heavy moving elements. The meters are classified with respect to the accuracy on light load found in the tests. Arbitrary accuracy groups are established and the percentage of all meters tested falling within the limits of each group is given.

Limits of Groups	Percentage of Meters in Each Group	
—	Sapphire	Diamond
Not recording	11,10 %	3,98 %
0 - 70 %	22,84 %	3,18 %
70 % - 80 %	8,82 %	1,79 %
80 % - 90 %	15,88 %	9,75 %
90 % - 96 %	14,65 %	20,45 %
96 % - 98 %	7,69 %	12,73 %
98 % - 102 %	9,75 %	28,03 %
102 % - 103,9 %	4,27 %	8,95 %
103,9 % - 110 %	3,74 %	9,15 %
110 % - 120 %	1,20 %	1,59 %
120 % - 130 %	—	0,20 %
Above 130 %	0,06 %	0,20 %
	100,00 %	100,00 %
Total number tested	1497	503

Digitized by Google

With the increasing size of installations, the effect of stray fields produced by other meters or by adjacent conductors has come to be an important factor influencing the accuracy of metering. Under the direction of the Meter Committee of the Association of Edison Illuminating Companies, this effect has been investigated experimentally and theoretically at the Electrical Testing Laboratories of New York, with results which may be summarized as follows:

First: the effect of stray fields in altering the accuracy of a meter in which the braking magnets are astatically arranged, depends almost entirely upon the weakening or strengthening of the field in which the meter armature rotates, and is directly proportional to the change in field strength thereby produced. The effect of a stray field, if not excessively strong, in altering the strength of the braking magnets or in increasing the braking effect by threading the disc, in meters with astatic magnets is negligible. Hence in a meter, the normal field strength of which is known, the error produced by the field set up by a current in an adjacent conductor may be ascertained by computing the strength of the field set up by the conductor at the center of the meter armature, and taking the ratio of the strength of the component in line with the field of the meter to the strength of field produced by the meter windings. Evidently conductors may be disposed in such a way that the active component of the stray field is nil, and such a disposition is always to be sought, both in installing the meter and in making connections for testing the meter in position. In meters with magnets non-astatically arranged an additional effect is produced of weakening or strengthening these magnets and this effect cannot be computed in advance.

Second: the normal or full load field strength of the commutator meters most extensively used in the United States is about 80 C. G. S. lines per square centimeter for the smaller sizes and about 160 C. G. S. lines per square centimeter for the larger sizes. Evidently, therefore, the horizontal component of the earth's field, when uninfluenced by adjacent masses of iron may produce an error of one or two per cent. at ten per cent. rated load on the meter. Magnetized masses of iron in the vicinity of the meter may have a very marked effect upon its accuracy.

Third: when meters are placed close enough together, so

Digitized by Google

that the field of one meter or of the conductors leading thereto affects the accuracy of its neighbour, the total erroneous registration of one meter is proportional to the total registration of the other meter. The relations between their registrations may be expressed as follows:

$$M_1 = W_1 + K_1 W_2$$
$$M_2 = W_2 + K_2 W_1$$

in which M_1 indicates the registration of meter N° 1, W_1 the true watt-hours passing through meter N° 1, and K_1 is the coefficient of mutual effect depending upon the normal field strength of meter N° 2 and the normal field strength of meter N° 1.

In connection with this investigation, a method of determining the effect of stray fields in a given case was devised. This consists in detaching the potential connections of a meter from the line and attaching them to a pivoted galvanometer of moderate sensibility. If a stray field is present, it may be detected by rolling the shaft between the thumb and finger. The error produced by this field is readily determined by passing a current through the field windings of the meter in such a direction and of such magnitude that the galvanometer needle will remain on zero when the armature is so twirled. The error produced by this stray field at any load is computed by taking the ratio between the current necessary to reduce the effect of the stray field to zero to the current of the meter at the corresponding load. Evidently the direction of the correction is also readily determinable. This method is very convenient and can be applied to meters in position.

As a result of the increasing disturbance caused by stray fields, a new type of single armature astatic meter having four field windings and two sets of brushes has been produced and largely introduced into practice. Because of its smaller size and smaller weight of moving element, this meter is superior to the two-armature astatic type such as has been known for a long while. Moreover much more attention is paid to the proper location of meters to see that stray field effects are avoided. This is particularly necessary in the case of meters affixed to switchboards in large installations. In the case of large consumers, furthermore, it has been found to be

Digitized by Google

good practice to avoid the use of one very large capacity meter and to use instead several meters of smaller capacity, distributed among the various circuits of the installation. The cost of several meters may be slightly greater than that of one large meter and the time required in testing and in reading the several meters may also be somewhat in excess. However, the additional security in the matter of registration which is thereby gained is a very large compensating factor, and moreover, since the light load is rarely, if ever, uniformly distributed on the various circuits but is more or less concentrated on certain ones, on which circuits the meters will be well loaded, the increased accuracy at light loads due to the use of several smaller meters much more than compensates for the additional expense.

An installation, such for instance as is found in certain modern theatres, may require at full load several thousand *ampères* for a relatively short part of the day, and during the rest of the day may have a load of lamps required by the personnel which is an insignificant fraction of the full load of the installation, although it may be of considerable amount measured in *ampères*. If the regular lighting and the service lighting are on separately metered circuits, a considerable revenue will be realized which with a single large meter would probably be lost through the inaccuracy of the large meter on very light loads. In the practice of the New York Edison Company, meters are limited to 600 *ampères* capacity on the principle above stated.

Alternating Current Meters.

The commutator meter, although still found in smaller and antiquated installations where for commercial reasons it has been impossible to replace it, has ceased to be a factor in the measurement of alternating current. The induction meter, starting from Shallenberger's early *ampère*-hour type in which the retarding torque was produced by air damping, has been developed to a point of high perfection and is in every way a more reliable and satisfactory instrument than the commutator meter. In the absence of commutator and brushes, the friction is almost entirely confined to that of the step-bearing which on account of the light moving element is small and constant. In

Digitized by Google

American practice recording mechanisms are almost exclusively of the continuously-moving hand type and not of the intermittently moving or cyclometer type. Hence the friction of the recording mechanism is usually not an important factor.

The " lagging „ of induction meters, or the adjustment of the magnetic fluxes to a quadrature relation, is in almost all types of meter done by means of a short-circuited turn or turns round the potential pole. Unlagged meters are practically unknown.

In metering polyphase energy, polyphase induction meters are usually employed, although the practice of some companies favors the use of two or of three single-phase meters, on the ground that when this is done the failure of one meter will not involve the absolute failure to obtain a record. The use of two meters has the advantage that from their registrations the average power factor of the load can be computed. The use of two meters is subject to objection on account not only of the additional expense but also of the difficulty of explaining to customers the peculiarities of the system.

Polyphase meters have been investigated by the Electrical Testing Laboratories for the Meter Committee of the Association of Edison Illuminating Companies to determine the amount of error due to the electromagnetic interaction or " interference „ of the two metering elements. It was found that various makes of meters differed considerably in this respect. In some makes the effect of interference of elements was so small that careful tests failed to reveal it. In other makes the interference was such that relatively serious errors might under certain conditions be introduced by it. The facts being brought to the attention of the manufacturers whose meters were defective in this respect, caused action to be taken whereby the difficulty was obviated so that the polyphase meters now on the market are capable of measuring polyphase energy correctly, the two elements being, for all practical purposes, independent of each other. A specification for the test of independence of elements based on these investigations is incorporated in the Meter Code, as follows:

First: element A is connected to phase I of a twophase circuit and has a certain current flowing through its current coil. The voltage coil of element B is also connected to phase I and accuracy readings are taken with the current in the vol-

Digitized by Google

tage coil of B, direct and reversed. Next, the voltage coil of B is connected to phase II and similar readings are taken. Finally, with the voltage coil of element B disconnected, a current is sent through the current coil of element B, equal in value to the current passing through the current coil of element A. The current through element B is taken first from phase I and then from phase II and in each case the direct and reversed readings are compared. Tests are made with both light and full load currents. Under any given set of conditions the difference between the direct and reversed readings must not exceed one per cent. In case a meter shows a greater variation than this, it must be tested on a polyphase load with the direction of rotation of the phases given so that in installing the meter the same direction may be preserved.

All types of meters conforming to this specification may be tested in practice on a single phase circuit, their current coils being connected in series and their potential coils in parallel. In practice this method of testing is most generally employed.

The increase in the size of installations and in the voltages used has made current and potential transformers instruments of much greater importance than formerly, and with the increased scrutiny of meter accuracy these instruments have been subjected to more searching tests as to their effect upon meter performance. A number of methods of determining with precision the ratio and phase angle of transformers have been devised. These may be classed as the direct and indirect methods. A notable example of the indirect method is that described by Signor Barbagelata in the Transactions of the Italian Electrotechnical Association for September-October, 1910. The author prefers the direct method which he has described in connection with Mr. Crawford (1). This is a zero method in which the fall of potential of the primary current in a non-inductive shunt is balanced against the fall of potential of the secondary current in another non-inductive shunt. The point of balance is determined by using a synchronously driven rectifying key and a direct current galvanometer. The phase-angle between the primary and secondary currents is determined by introducing a

(1) *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1910, pag. 1207.

Digitized by Google

calibrated standard of mutual induction, the primary winding being connected in the secondary circuit of the transformer and the secondary winding being connected in the galvanometer

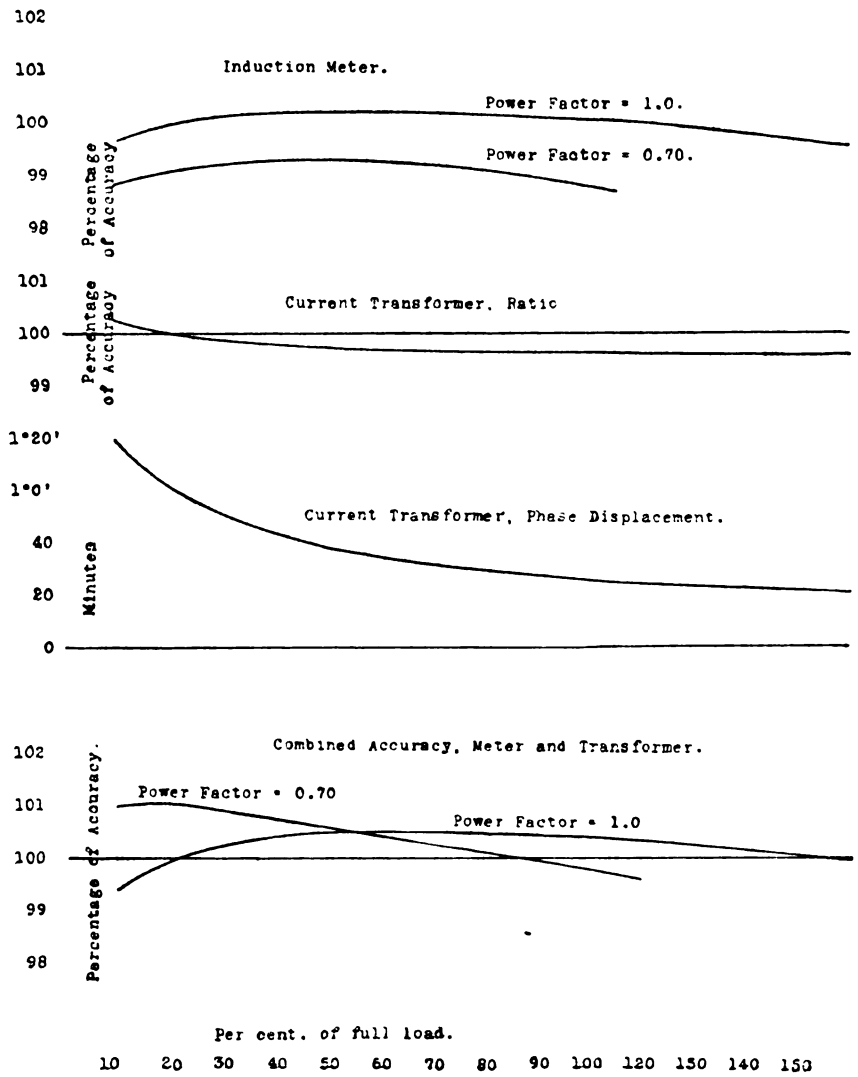


Fig. 1.

circuit, to set up an electromotive force in opposition to the inductive component of fall of potential from one shunt to the other. This method being a zero method throughout, enables measurements to be made on a circuit with unsteady voltage,

Digitized by Google

and inasmuch as the ratio of transformation comes out as the ratio of two resistances, this value may be measured with very high precision as well as with great convenience.

Typical curves are shown in fig. 1 of the performance of a good modern induction meter and of good modern commercial measuring transformers, also of the meter combined with transformers under two conditions of power factor.

Maximum Demand Meters.

The maximum demand meter is of chief significance in connection with the sale of energy to very large consumers, especially those who contract for a bulk supply of polyphase current at high tension, in which case the contract is usually drawn on a maximum demand basis.

The use of maximum demand meters for smaller consumers is on the decline rather than on the increase. The thermal type of maximum demand meter has not shown itself to be the best adapted to the conditions arising through the bulk supply of polyphase current. The maximum demand in this case is usually, if not always, based on kilowatts rather than kilovolt-*ampères*. Hence the use of a maximum watt demand meter is practically unavoidable.

Three types of polyphase maximum demand meters are in use. The first type is an indicating meter in which a hand is pushed along and left at the maximum point which it has attained. The actuating mechanism is similar to that of a polyphase induction meter. The rotation of the disc is restrained by a spring and the time element of the maximum demand is controlled by the amount of magnetic damping of the disc. The disc is made of bronze so that temperature changes have little effect. The instrument has the advantage that the maximum demand can be read at once from its dial and that it is very easy to maintain. It suffers the disadvantage that no record of demand is obtained other than that taken down by the meter reader and that the time at which the maximum demand occurred is not indicated.

In the second type an automatic printing attachment is combined with the clock-work of a watt-hour meter whereby a record of the rate of use of energy is left on a moving tape.

Digitized by Google

In one type of attachment the kilowatt-hours registered by the meter are printed at stated intervals. In another type of attachment a mark is made on the tape for each kilowatt-hour or 10 kilowatt-hours of registration. In the first type the maximum demand is ascertained by finding the maximum difference between any one figure and the one following it. In the second type the maximum demand is found by counting the number of marks in a length of tape corresponding to the time interval chosen. This type of indicator, while more troublesome to read, has the advantage of leaving the record of not only the maximum amount of demand, but also the time at which the demand was made.

The third type is a simple curve-drawing instrument. The maximum demand is obtained directly from the curve from which also the time and duration of the demand may be read.

The Maintenance of Meters in Service.

It is well recognized that a high efficiency in metering can be obtained not only by the use of none but reliable meters, but also only by eternal vigilance in maintaining these meters in a state of high accuracy. For this purpose the larger companies maintain well equipped meter departments which, through a more or less elaborate system, seek to obtain this end. Such meter departments are not infrequently equipped with the highest grade of primary standard instruments such as standard cells, potentiometer, standard manganin resistances, etc., and this equipment is actively used in maintaining the accuracy of the reference and working standards which are employed in meter testing. The meter departments are equipped also with direct reading instruments of the most reliable type for direct use with the meters, and with all necessary appliances for accurate meter testing in the laboratory.

Meters are usually tested in the laboratory before installation on the consumers' premises and are given an additional test after the commutators have reached a normal operating condition — say after two weeks' to one month's use. Following this, tests are made of the meter at periodic intervals. The period varies according to the conditions of the case. Meters controlling a very large amount of revenue may be tested as often

Digitized by Google

as once a month, while the ordinary run of meters are tested at least once a year, once in 18 months, or once in two years, the period varying with different companies. It is generally acknowledged that the period between tests can be longer in the case of induction meters than in the case of commutator meters. The tendency in the case of induction meters is to extend the period to 18 months or two years, whereas the maximum period of one year is generally accepted for commutator meters. At the time of the test not only is its accuracy determined and the meter readjusted if required, to register correctly, but it is also examined for mechanical and electrical defects. In particular, the jewel is removed and examined with a needle point for flaws or damage and the pivot is removed and examined under a magnifying glass. The usual practice is to put in new pivots at the time of each periodical test. In some cases sapphire bearings are renewed at each periodical test, regardless of their condition. With other companies, sapphires found in an undamaged condition are put back into the meter for further service. Diamond bearings are also examined, although they are nearly always found in condition for further use. Pivots used with diamond bearings require more frequent renewal than the jewel itself.

As regards the methods used in testing on consumers' premises, considerable advance has been made recently by the introduction of so-called " rotating standards „. These are watt-hour meters similar to those actually used in service, but enclosed in a carrying case and having a hand affixed to the end of the shaft and moving about a dial graduated into 100 parts and visible from above. These meters have several field windings corresponding to different values of full load. For example, a rotating standard may have windings for full loads of 1, 5, 10, 20 and 40 *ampères* or for 1, 5, 10, 50 and 100 *ampères*. These rotating standards are carefully checked in the laboratory, and on the consumers' premises are connected in the circuit with the meter to be tested. For the full load test on the meter the corresponding current coil of the rotating standard is connected in series, so that for this test the rotating standard runs under heavy load; that is, under the condition at which its accuracy and reliability are greatest. For the light load test of the meter, another coil of the rotating standard is connected in so that in this test also the rotating standard operates under heavy

Digitized by Google

load conditions. The heavy load accuracy of the meter being but little influenced by minor changes in the meter's condition, the rotating standard used in the way indicated above, furnishes a sufficiently accurate instrument for the check of consumers' meters.

The operation of testing with a rotating standard is a very simple one, consisting in the determination of the number of revolutions and the fraction of a revolution of the moving element of the standard, corresponding to a given number of revolutions of the moving element of the meter under test. The Philadelphia Electric Company equips its standards with an electrical contact which gives a click in a telephone each revolution. Observations are then made by an eye and ear method, the tester observing the revolutions and fractions of a revolution corresponding to a whole number of revolutions of the disc of the standard, noting the latter by the aid of a telephone receiver. In some cases, arrangements are made for starting and stopping the rotating standard at the instant the spot on the disc of the meter under test passes the observation window in the case. This starting or stopping may be accomplished by opening the potential coil of the rotating standard, by short-circuiting its current coil, or by causing the moving element, which is continually in rotation, to pick up and drop the hand through the agency of a little magnetic clutch. It will be seen that this method of testing eliminates the use of stop watches, always a very troublesome element in meter testing, and minimizes the effect of voltage fluctuations. It also reduces the computation of results to a minimum. In the case of direct current meters, some provision is made for bringing the temperature of the potential winding quickly to its normal value, such as connecting it to double voltage for a short period. Tests by rotating standards are rapidly superseding the older tests made against voltmeter and ammeter or against an indicating wattmeter.

Other details tending toward speed and accuracy in meter tests on consumers' premises have been worked out with no little care. For example, in the matter of providing real or fictitious loads for meters, various systems are in successful operation. One of these is to carry suitable rheostats which may be connected in place of the consumer's installation, the meter being bridged during the operation so that the consumer's supply

Digitized by Google

is not cut off. These rheostats are made in very portable form, so that they are carried without difficulty. In the case of the Edison Electric Illuminating Company of Boston, these rheostats are standardized so that each particular step corresponds at the normal voltage of the system to a given watt load of a given size meter. They are wound with wire of zero temperature coefficient, so that the true energy supplied to a direct current meter is determined by the reading of a voltmeter alone, the resistance of the rheostat being a determined quantity. This method has very considerable advantages.

To supply a load for direct current meters of large capacity, some companies use a portable storage battery, for example, two cells of Edison vehicle battery, by which a heavy current may be passed through the field windings of the meter when the latter have been disconnected from the supply circuit. The current is regulated by means of a small carbon plate rheostat attached to the same carrying case. These batteries are quite portable and the use of them makes it unnecessary to resort to cumbersome water rheostats, etc. or to make the test on the consumer's varying load. The potential coils are of course supplied from the system.

For tests of alternating current, meters of large capacity, a small step-down transformer is sometimes used to furnish the current for the field windings. The meter is then tested with an equivalent power factor which is somewhat less than 100 per cent.

Another detail which may be mentioned is the use of special wagons for transporting the meters to and from the consumers' premises. During transportation the meters are laid on elastic pads to preserve them from injury due to mechanical vibration.

In the installation of meters a number of new systems have been devised whereby theft of current of tampering with the meter is made extremely difficult.

To facilitate the operation of testing, special connection blocks are installed in connection with the meter whereby the consumer's load may be shunted around the meter and the testing load and standard instruments may be connected into the meter circuit with the greatest facility.

Beside the usual periodic tests of meters, inspections of meters are made, tests are made on complaint of consumers and

Digitized by Google

also at the demand of the accountig department of the company to determine the reason for abnormal fluctuations in registration. Moreover, the work of the testers may be verified by check

Fig. 2.

testers who follow the regular testers as required, and determine the accuracy and efficiency of their work. All results of tests turned in to the meter department are carefully scrutinized by examiners to detect any outstanding error.

Digitized by Google

In order to maintain an elaborate system like this, the largest companies have found it necessary to do a considerable amount of educational work. In fact some companies have, by grading

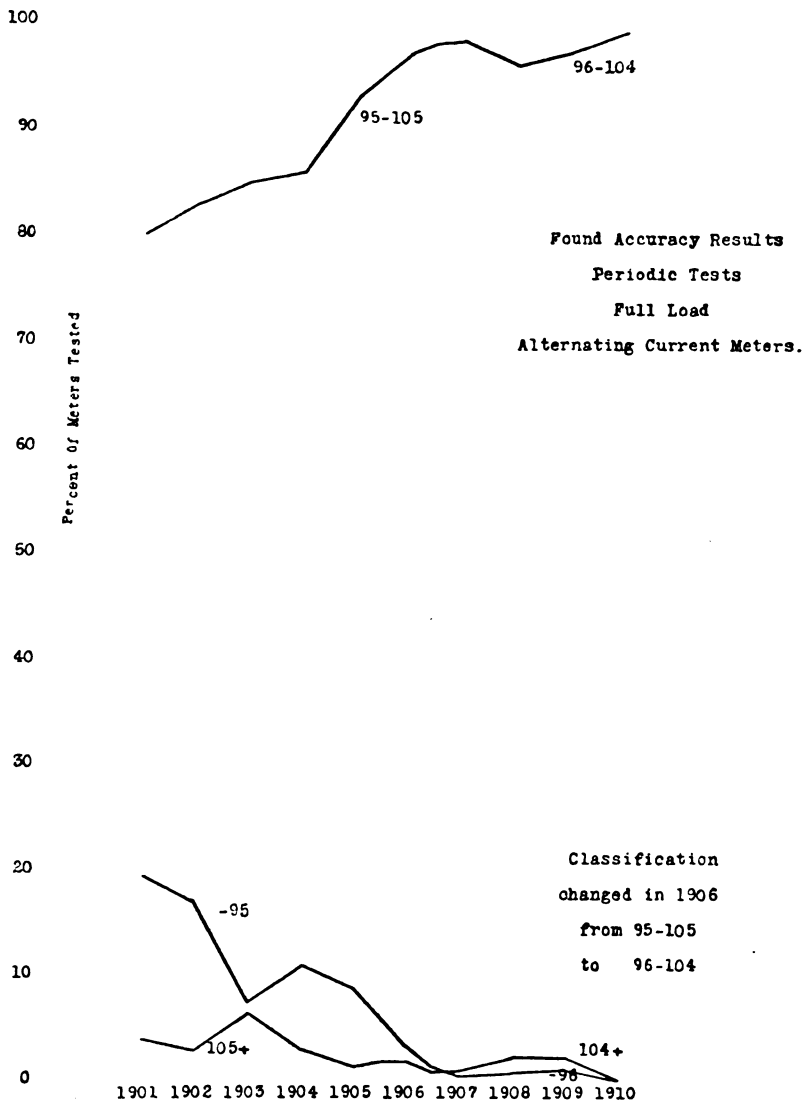


Fig. 3.

the work and organizing a system of promotions, provided what is practically a school for meter testers. Meter departments also generally maintain a very considerable mechanical equipment

Digitized by Google

for the repair of damaged meters, and keep on hand a supply of extra parts for repair purposes.

Again, a system such as is very briefly sketched above, is

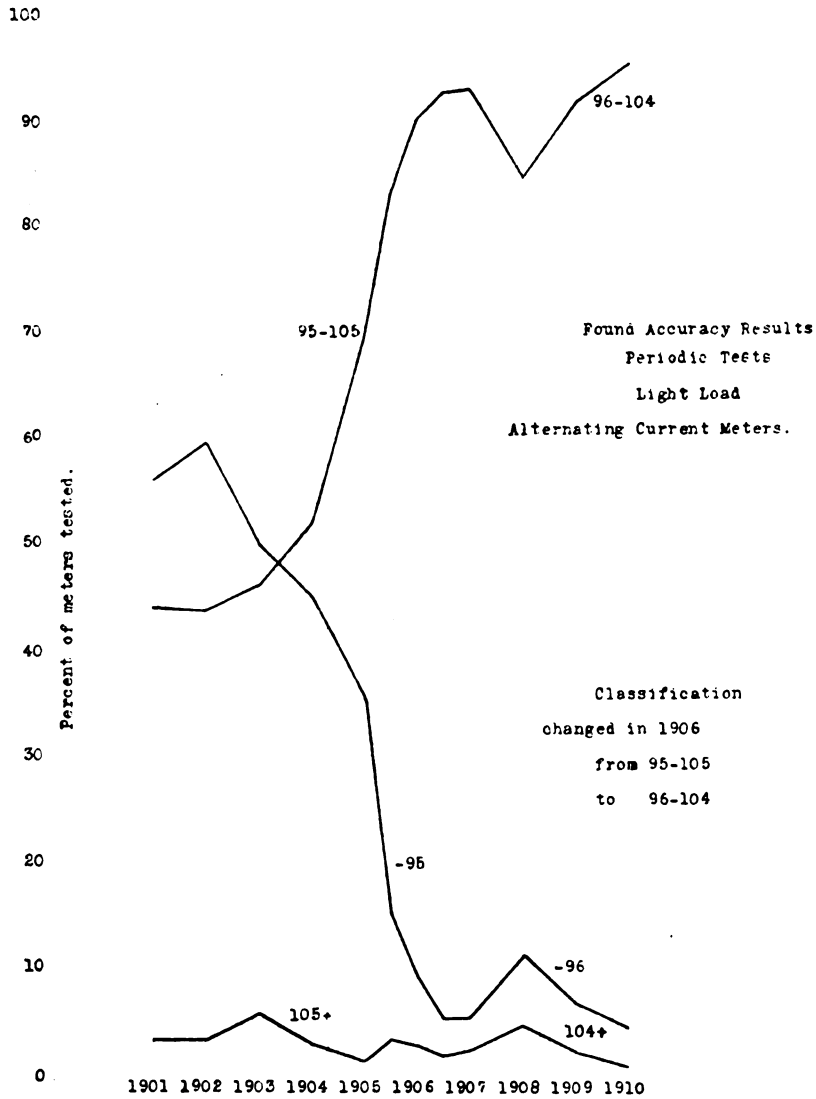


Fig. 4.

not only elaborate, but expensive. It must justify its existence by the results which it produces. Its results are best seen in the increased accuracy of consumers' meters, since increased accu-

Digitized by Google

racy means inevitably increased revenue. In Fig. 2 is given a curve showing the improvement in efficiency of metering of direct current attained by a very large operating Company during the period 1907 to 1910. In Figs. 3 and 4 are similar curves showing the corresponding increase in the efficiency of metering of alternating current for the same Company. The increases here shown are due of course in a very considerable measure to the improvements in the meters cited above and cannot all be credited directly to the operations of the meter departments. It is, however, true that unless the operating companies were generally equipped with efficient meter departments, which are making close observations of the performance of meters in service, and which bring clearly to view the shortcomings to which meters are subject, the manufacturers of meters would have very much less information on which to base improvements than otherwise would be the case. So that the operating companies should also have some share in the credit for improved meters.

One other point deserves consideration: namely, the answer to the question " What is in accurate meter? „. The allowable limits of variation of meters from absolute accuracy are usually defined in governmental statutes, and this question need not be gone into here. An important practical question is that of giving a single figure to designate the average accuracy of a meter. The error of a meter usually being different at light load from what it is at full load, and having still other values at intermediate loads, it is difficult and embarrassing to answer inquiries from consumers as to what the accuracy of a particular meter is. Some companies have adopted the radical practice of giving as the error of the meter the maximum error found at either light or full load and have based their customers' rebates for fast meters on this figure, making the rebate on the assumption that the error had changed uniformly with the time from zero at the time of its previous periodic test to the time at which it is found fast. In other words, the error as found is assumed to apply to one half of the period elapsed since the last previous test of the meter. This system evidently gives a maximum of advantage to the consumer. For the purpose of giving a single value to the accuracy of a meter, the system of averaging loads which has been put into effect by the Public Service Commission of the State of New York, First District, is worthy of con-

Digitized by Google

sideration. Under this system each meter is tested at three loads; namely light load, full load and normal load. The normal load of a meter as a percentage of its full load rating is determined by the character of the installation in accordance with the following schedule:

A) Residence and apartment lighting	25 %
B) Elevator service	40 %
C) Factories (individual drive), churches and offices	45 %
D) Factories (shaft drive), theatres, clubs, entrances, hallways and general store lighting	60 %
E) Saloons, restaurants, pumps, air compressers, ice machines and moving picture theatres .	70 %
F) Sign and window lighting and blowers . .	100 %

The average percentage of accuracy is obtained by assigning a weight of 3 to the percentage of accuracy at normal load and the weight of 1 each to the tests at light load and at full load.

This system has been found in the practice of the companies operating under it, to possess very many advantages. Not only does it give the single value required for designating the accuracy of a meter, but it bases this value on a system of weights given to the accuracy at different loads, which when the weights are properly chosen, makes it a very fair method of fixing this accuracy with respect to the probable consumption which should be charged against the consumer. The additional labor involved in testing at three loads rather than two is practically a minor disadvantage of this system. Its chief disadvantage is that a very considerable inaccuracy at either light or full load, or both, may be masked by the average value. For instance, a meter may be quite fast at full load, correspondingly slow at light load, and still qualify as an accurate meter under the above definition. Evidently other systems of averaging loads could be devised, each of which would have its advantages and its disadvantages.

In conclusion, we may say that American practice is characterized by co-operation between the supply companies in regard to information on meter topics, and between the Associations and the manufacturing companies in the production of

Digitized by Google

improved apparatus; that practically all meters used are watt-hour meters of the commutator type for direct current and of the induction type for alternating current, the capacities being proportioned to the size of the installation and meters being chosen rather too small for an installation than too large; that investigations of meters and of metering conditions have resulted in improved apparatus and in better meter practice; that meters in use are very carefully followed by periodic and other tests made on the consumers' premises and are thereby maintained in a state of high efficiency, the expenses incurred thereby being more than returned by the increased revenue drived from the meters.

Appendix.

The following is a brief summary of the principal specifications covering an acceptable type of meter as laid down in the Meter Code.

1. *Initial Accuracy of Registration.* — Direct current meters shall run continuously at 2 per cent. rated current and shall record

within ± 7.5 per cent. at 5 per cent. rated current
" ± 3 " 10 " "
" ± 2 " 100 " "

Alternating current meters shall register

within ± 3 per cent. at 5 per cent rated current
" ± 1.5 " 100 " "

2. *Effect of Variation in Power Factor.* -- A power factor of 75 per cent. shall not cause more than ± 2 per cent., and a power factor of 50 per cent. shall not cause more than ± 4 per cent. variation in the registration of the meter at either light or full load.

3. *Effect of Variation in Voltage.* — In direct current meters a variation of ± 10 per cent. voltage shall not cause an error of more than ± 5 per cent. at light load, or ± 3 per cent. at

Digitized by Google

full load. In alternating current meters the corresponding figures are ± 2 per cent. and ± 1.5 per cent.

4. *Effect of Variation in Frequency.* — The effect of ± 10 per cent. variation in frequency at full load shall not be more than ± 1.5 per cent.

5. *Equality of Elements of Three-Wire Meters.* — The elements may not differ by more than ± 2 per cent.

6. *Effect of External Magnetic Field.* — On direct current meters a uniform field of 0.1 C. G. S. line per square centimeter applied in the direction to have a maximum effect shall not change the rate of the meter by more than 2.5 per cent. For alternating current meters, an arbitrary test is prescribed.

7. *Effect of Variation in Temperature.* — The average temperature coefficient shall not exceed 0.2 per cent. per degree between 20° and 40° C.

8. *Effect of Temporary Overloads and Short Circuits.* — For meters less than 600 *ampères*, 400 per cent. overload applied three times, two seconds each time, shall not change the registration by more than ± 5 per cent. at light load, or ± 3 per cent. at full load. The corresponding values for alternating current meters are ± 1 per cent. on both light and full loads.

9. *Potential Drop in the Field Coils.* — This shall not exceed 1.5 per cent. of the rated voltage of the meter in meters of less than 10 *ampères* capacity, or 0.75 per cent. in meters of 10 *ampères* capacity and larger.

For polyphase meters, in addition to the test for independence of elements which has been referred to above, tests are made for the initial accuracy of registration, the limits being as in the case of single phase meters; for the accuracy of individual elements ± 2 per cent.; for the effect of variation in power factor, the limits being the same as for single phase meters; the effect of variation in power factor of the individual elements, the limits being in this case widened to ± 3 per cent. under conditions unfavorable to the accuracy of the meter; also for the other metering features the same as in single phase meters.

Similarly, current transformers must conform to the following conditions as to variation of ratio from its nominal value and as to phase angle at light load and at full load.

Digitized by Google

Percent of Rated Current	Light Load		Full Load	
	Ratio	Phase Angle	Ratio	Phase Angle
10	$\pm$ 2 %	2° 30′	$\pm$ 3 %	4° 30′
25	$\pm$ 2 %	1° 30′	$\pm$ 2 %	3°
50	$\pm$ 2 %	1°	$\pm$ 2 %	1° 30′
100	$\pm$ 2 %	1°	$\pm$ 2 %	1°
150	$\pm$ 2 %	1°	$\pm$ 2 %	1°

In voltage transformers the ratio may not deviate by more than 2 per cent. of its nominal value and the phase angle shall not exceed one degree with either light or full load. Ten per cent. variation in the voltage of a voltage transformer shall not cause a change of more than 0.5 per cent. in the ratio of transformation, nor more than 30′ in the phase angle.

It may be stated that the above specifications are not intended to cover simply the very best of modern apparatus, nor do they represent the highest results obtainable by the very best types of meters under laboratory conditions, but they are intended to cover such apparatus as should be considered commercially satisfactory and proper apparatus to use at the present time; that is, the apparatus which was the best of its kind a few years ago would in most cases still be acceptable under the specifications as drawn.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Le Rapport se borne à exposer la pratique suivie en Amérique, laquelle est une résultante de certaines considérations commerciales, de l'association intime des compagnies de vente d'électricité entre elles, et d'une entente tacite avec les constructeurs de compteurs, en vue du perfectionnement technique du compteur électrique et de son utilisation commerciale.

On attache la plus grande importance à l'exactitude de l'enregistrement de ces appareils, et tous les perfectionnements tendent vers ce but. Presque tous les compteurs employés sont des compteurs d'énergie. Pour le courant continu, le compteur genre Thomson est presque partout adopté. Les perfectionnements apportés récemment à cet instrument sont:

1° *l'allègement de l'organe pivotant, où un disque en aluminium remplace l'ancien disque en cuivre;*

2° *l'adoption d'un induit sphérique plus léger, qui, moyennant une meilleure disposition de l'inducteur, fournit un couple plus puissant par unité de poids;*

3° *l'emploi d'un collecteur de moindre diamètre, de balais perfectionnés, dont le contact sur le commutateur s'effectue uniquement par l'effet du poids et non plus par des ressorts; d'un support de pivot formé d'un diamant creusé en cratère qui répond parfaitement à son objet, au lieu du saphir de jadis. Grâce à ce dernier perfectionnement, on obtient une permanence d'exactitude beaucoup plus grande en regard de frais d'entretien beaucoup moins élevés.*

L'effet des champs magnétiques extérieurs a été l'objet d'une étude spéciale (descriptions des inconvénients qu'ils causent et des moyens employés pour les éliminer, entre autres un compteur spécial à quatre pôles). Une méthode à zéro a été imaginée pour mesurer l'intensité d'un champ magnétique extérieur, en employant l'induit du compteur même comme détecteur de ce champ, et en lui opposant un champ égal produit par l'inducteur.

Pour les courants alternatifs, on se sert de compteurs à champ magnétique tournant (compteur d'induction), capables d'enregistrer très exactement la puissance des courants. Pour mesurer l'énergie

Digitized by Google

polyphasée, on emploie généralement les compteurs polyphasés, bien que certaines compagnies accordent la préférence à l'emploi de deux ou trois compteurs monophasés.

Les compteurs polyphasés ont été étudiés à l'effet de déterminer les erreurs dues aux actions électromagnétiques réciproques des deux moteurs. Les types sujets à ces erreurs ont été revus par les constructeurs dans le but de remédier à ce défaut, et les compteurs polyphasés, actuellement sur le marché, mesurent correctement l'énergie polyphasée, leurs deux éléments ayant été rendus indépendants l'un de l'autre (Système préconisé pour vérifier cette indépendance).

Les transformateurs de mesure ont été également étudiés, et l'on indique une méthode de mesure du rapport de transformation, et du décalage entre les courants primaires et secondaires.

Les compteurs de dépassement sont principalement employés dans les grandes installations triphasées. Ils sont de trois espèces :

1° *compteur polyphasé dont l'équipage mobile est freiné par un ressort et qui est muni d'une aiguille indiquant, sur une échelle, la charge maxima que le compteur a eu à supporter ;*

2° *compteur polyphasé ordinaire relié à un dispositif enregistreur, mû par un mouvement d'horlogerie, qui imprime, à des intervalles donnés, les chiffres indiqués par le compteur ;*

3° *wattmètre enregistreur.*

L'entretien des compteurs est assuré par un service spécial des Compagnies, qui disposent à cet effet des laboratoires nantis des étalons et des instruments de précision nécessaires. Le but que l'on poursuit est d'arriver à examiner et à étalonner les compteurs sur place, à des intervalles réguliers et suffisamment rapprochés pour garantir la permanence d'une exactitude satisfaisante. Des compteurs spéciaux sont très employés depuis peu pour l'étalonnage des compteurs sur place. Ils sont munis de plusieurs enroulements à gros fil et d'une aiguille fixée à l'équipage, qui se déplace sur un cadran. Grâce à ces différents enroulements le compteur étalon fonctionne à pleine charge en essayant un compteur sous pleine charge aussi bien que lorsqu'il n'est chargé qu'au $^1/_{10}$ de sa capacité. Le compteur étalon conserve alors une précision suffisante pour l'étalonnage des compteurs d'abonnés, et permet aussi de réduire au minimum l'influence des fluctuations de la tension du réseau. Des indications sommaires au sujet de divers détails sur les essais et l'entretien des compteurs sont données, avec les résultats fournis par les essais périodiques qui sont indiqués par des courbes.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. P. TORCHIO (New-York). *Nous sommes, je crois, tous d'accord au sujet de l'importance énorme de l'exactitude des compteurs surtout pour les Sociétés industrielles de distribution d'énergie électrique. Une entreprise municipale peut parfois tolérer un certain degré d'imprécision dans les compteurs, mais une Société industrielle ne le peut absolument pas. La Société Edison (N.-Y.) s'est occupée beaucoup de ces compteurs, et pendant les dernières dix années elle est arrivée à en améliorer les indications de 5 %. Ce chiffre représente une rentrée qui couvre dix fois les frais de contrôle et qui est équivalent au 2 % du capital social.*

Il est très important que l'on fasse les essais des compteurs chez le consommateur, raison pour laquelle la Société Edison a étudié un bloc spécial d'attache, qui permet l'insertion des instruments de contrôle sans déranger le consommateur.

Digitized by Google

Compteurs électriques à tarifs multiples.

Jules Neher (Genève)

La Vente de l'Énergie électrique.

Le fait que nous rencontrons pour la vente de l'énergie électrique une multitude innombrable de différents tarifs, plus ou moins compliqués, plus ou moins rationnels, est une indication que la vente de cette denrée doit représenter de grosses difficultés pour le vendeur qui cherche à trouver son bénéfice tout en livrant sa marchandise à l'acheteur à des conditions suffisamment avantageuses pour lui en permettre l'application à tous les différents usages auxquels elle se prête.

La raison primordiale de ces difficultés réside précisément dans le fait que pour l'énergie électrique le rapport entre la demande et l'offre varie constamment pendant la même journée; pendant un nombre d'heures fort restreint la demande est excessive par rapport à la capacité des installations, pendant le reste de cette même journée, le réseau insuffisamment chargé ne demande qu'à augmenter son débit.

Pour tout autre produit industriel ou agricole, cette fluctuation entre la demande et l'offre entraîne forcément une variation des prix de vente. Pour des primeurs hors saison nous sommes toujours prêts à payer des prix exorbitants, en proportion avec notre gourmandise, et beaucoup d'autres produits, par la facilité de leur emmagasinage même, arrivent à une régularisation de leur prix de revient et de vente. Pour l'énergie électrique il en est tout autrement; les quelques heures pendant les soirées de fête de Noël et de Nouvel-An, qui taxent un réseau électrique

Digitized by Google

à sa limite extrême de surcharge, obligent à faire l'installation de fortes réserves de production et de canalisation.

En fixant un chiffre immuable comme prix de vente de l'énergie électrique, il est donc naturel que le débit de toute l'année doit servir à couvrir les dépenses d'installation et d'amortissement nécessitées par les heures de surcharge; le produit des heures de faible charge restera donc relativement cher, et le prix élevé, en contradiction avec la faiblesse de demande, contribuera à intimider celle-ci qui aurait besoin, au contraire, d'être encouragée par un prix alléchant. A prix fixe, l'éclairage électrique restera forcément un éclairage de luxe, l'énergie électrique sera hors de portée des petites bourses.

Différents tarifs en usage.

Depuis que l'énergie électrique est offerte au public pour ses différents besoins, le souci continuel des producteurs d'électricité a été d'établir des tarifs s'adaptant mieux aux besoins du public et permettant de corriger en quelque mesure le défaut d'origine de cette industrie, c'est-à-dire son prix de revient continuellement variable. Il ne peut être dans le cadre de cette communication de passer en revue et de discuter tous les différents systèmes, toutes les sous-rubriques de tarifs essayés ou appliqués d'un bout du monde à l'autre; ils sont légion et varient pour ainsi dire d'un réseau à l'autre, de même que dans beaucoup de cas le même réseau est régi sous un différent système de tarif, selon qu'il s'agit de gros ou petits clients, d'éclairage ou de force, d'industriels ou de particuliers. Nous nous bornerons à effleurer les catégories les plus en vue des différents tarifs.

Les *tarifs à forfait*, simples ou gradués, auront toujours pour conséquence de limiter l'installation des abonnés tout en laissant à leur discrétion le gaspillage inutile pendant les heures où la Centrale est déjà surchargée.

Le *forfait à durée limitée*, donnant à l'abonné l'avantage d'un prix réduit pendant une certaine portion de la journée, nécessite un contrôle onéreux pour le producteur et vexatoire pour le consommateur. Le premier peut être remplacé par l'interrupteur automatique à heure fixe, système dont la brutalité

Digitized by Google

n'est certainement pas appréciée par la majorité des consommateurs.

La vente à *tarif simple à compteur* évitera le gaspillage et laissera au consommateur la liberté d'amplifier son installation, mais ce système n'aura aucune influence régularisatrice sur la charge maxima de la Centrale, le client, qui paye toujours au prix le plus élevé, n'étant pas intéressé à l'économie. Ce système caractérise donc l'éclairage de luxe.

Pour corriger ce déséquilibre, les *tarifs à rabais à compteur* ont été introduits. Les rabais s'appliquent suivant l'importance de l'installation, suivant l'importance de la consommation ou suivant l'utilisation des KW. installés. Ils peuvent être combinés avec le tarif à forfait, et leur établissement se fera pour chaque cas suivant de longs et pénibles travaux de mathématique et nécessitera toujours un énorme service de calculation pour établir la facture; en outre tous les tarifs à rabais occasionnent de grosses difficultés lors du changement d'un abonnement, cas fort fréquent vu le mouvement continuel de la population, dans une grande ville.

Le *tarif basé sur le maximum* de la consommation au moyen du système *Wright* a paru un instant solutionner le problème, mais son application peut précisément résulter en une augmentation du prix de vente ou plutôt une réduction du rabais par le fait que l'abonné dans les heures de faible charge ou en été a augmenté sa demande d'énergie. En utilisant de la force bon marché il a fait augmenter le tarif de *toute* sa consommation. Sur le réseau de Oberhausen, par exemple, le courant coûte plus cher en été qu'en hiver. Cette anomalie a été jugée dans un rapport de l'Union des Centrales allemandes, qui dit: " N'est-ce pas le monde à l'envers? Ce système de tarif ne doit-il pas forcément réduire la consommation déjà trop faible? „.

Le *double tarif* lors de son introduction paraissait heureusement combler la lacune et, en effet, a rendu de bons services. Il s'applique spécialement là où la Centrale débite beaucoup de force pendant le jour; toutefois il ne peut couvrir les extrêmes de la courbe de charge. Le prix inférieur ne sera pas assez bas pour permettre l'usage de l'énergie électrique sur une grande échelle pendant les heures ordinairement trop peu chargées; le prix supérieur, par contre, ne sera pas assez élevé en comparaison du prix de revient des heures de surcharge; enfin ce système nécessitera un double calcul pour l'établissement de la comptabilité.

Digitized by Google

Multiples sont aussi les combinaisons entre le prix à forfait et les tarifs à compteur, mais ces systèmes en général deviennent tellement compliqués que le simple mortel ne s'y reconnaît plus et forcément s'en méfie.

Nous citerons comme intéressants les *tarifs à dépassement* avec compteur simple ou double où l'abonné paye à part sa consommation, en sus d'un certain maximum; ce système certainement limitera l'excès, mais en général il ne favorisera pas l'utilisation payante pendant les heures de faible charge.

Il existe aussi des *tarifs à compteur horaire* s'appliquant à certains appareils dont le débit est fixe (pompes, ventilateurs, ascenseurs), et qui indiquent le temps pendant lequel l'appareil a fonctionné, le prix étant calculé d'après une base prédéterminée.

On a cherché enfin à appliquer des tarifs variables basés sur les indications d'*appareils enregistreurs*, mais le prix et le fonctionnement délicat de ces appareils ne permettent guère l'application de ce système que pour des cas exceptionnels, chez de très gros consommateurs, par exemple.

Un tarif de vente *basé sur les moyens du consommateur et chiffré, par exemple, suivant les impôts qu'il paye*, a été proposé, mais n'a pas, à notre connaissance, été appliqué.

Nécessité de tarifs différentiels.

Dans une récente et fort intéressante discussion parue dans la " Elektrotechnische Zeitschrift „ (Berlin) sur " La popularisation de l'éclairage électrique „, et en réponse à un article de Monsieur Wikander (Gothenbourg) préconisant le système à forfait, M. l'ingénieur Schiff (Grünewald-Berlin) recommande la réduction du prix du KW-heure pendant les heures de faible charge *sans distinction de son utilisation*, et Monsieur Muller (Charlottenbourg-Berlin) conclut qu'un Calculateur à prix serait le vrai moyen pour populariser l'utilisation de l'électricité.

Monsieur le Professeur Rasch (Aix-la-Chapelle) dans une savante contribution à la question a fait ressortir les avantages d'une tarification *à prix variables* en faisant remarquer qu'au producteur de l'énergie il importait moins à quel usage servait l'énergie produite que l'*heure* à laquelle celle-ci était consommée.

Digitized by Google

Par une étude fort documentée Monsieur le Prof. Wyssling (Zurich) a pris part à la discussion de la question des tarifs en Suisse; il conclut:

" Il nous paraît qu'aux conditions de fourniture de courant " par nos Centrales s'adaptent le mieux des tarifs permettant " de varier le prix du KW-heure suivant l'heure de la journée " et l'époque de l'année, c'est-à-dire, de la saison. De tels sys- " tèmes seraient destinés à faciliter l'augmentation rationnelle " de l'utilisation de nos Centrales, et ceci de la façon la plus " logique et la plus compréhensible aux consommateurs.

" Du point de vue théorique la différenciation du prix de " vente suivant l'*heure d'utilisation* est la plus juste, la seule " fondée sur le prix de revient du courant, tandis que la tarifi- " cation suivant l'usage (lumière, force, chauffage) n'est justifiée " que du point de vue du consommateur.

" Par l'introduction des tarifs multiples on pourrait donner " satisfaction aux deux partis „.

Monsieur l'ingénieur Brandon (Madrid) dans une étude très complète des questions de tarif, parue dans la " Energía Eléctrica „ (Madrid), a passé en revue les différents systèmes de tarifs, leurs avantages et leurs défauts en arrivant à la conclusion suivante:

" En examinant attentivement toutes les considérations qui " viennent d'être exprimées au sujet des différents tarifs et " dont il faudrait tenir compte pour la réalisation d'un tarif " modèle, rationnel, on conçoit qu'il est, pour ainsi dire, impos- " sible „ (Monsieur Brandon ne connaissait pas encore le compteur à tarifs multiple) " d'entrevoir comment et sur quoi de- " vrait se baser un tel tarif. De nombreuses améliorations dans " l'élaboration et l'application des meilleurs tarifs actuellement " connus s'imposent donc, et nous pouvons dire que ceci est " d'une importance toute primordiale maintenant plus que jamais. " Nous ne saurions trop appeler l'attention des spécialistes en " la matière, et, en général, de tous ceux que la question in- " téresse, sur la nécessité et l'urgence des réformes à apporter " dans cette partie de l'exploitation électrique, et nous regret- " tons bien sincèrement qu'il n'existe pas un tarif à l'abri „ (ce problème est entretemps résolu entièrement) " de presque toutes " nos critiques que l'on puisse recommander aussi bien aux ex- " ploitants qu'aux consommateurs pour une garantie commune " de leurs intérêts respectifs et inséparables „.

Digitized by Google

Établissement du tarif multiple.

Par ce qui précède nous avons vu qu'un tarif différentiel gradué trouverait son application et aurait des avantages sur les tarifs actuellement et généralement en usage. Mais comment s'établirait un tel tarif différentiel sur une base mathématique et en rapport parfait avec les besoins du réseau?

Nous ne pouvons mieux faire que de citer un exposé fort précis de Monsieur le Dr. O. Gualerzi (Rome) se basant sur la méthode Schwabach pour le calcul des prix de revient de l'énergie électrique suivant les variations de débit. — Monsieur Gualerzi écrit:

" Dès 1903, l'ingénieur M. Schwabach (Berlin) — "Elektrotech-
" nische Zeitschrift „, 1903, page 495 — partant du fait qu'une
" portion des frais annuels de production de l'énergie élec-
" trique est indépendante de la quantité totale de l'énergie
" produite durant l'année et dépendante uniquement de la charge
" *maximum*, arriva à la conclusion que le coût du KW-heure
" devrait être considéré comme variable et fonction de la valeur
" instantanée de la charge.

" Ce principe établi, il expose une méthode fort ingénieuse
" pour déterminer le coût du KW-heure en fonction de la
" charge instantanée „.

Brièvement la méthode de Schwabach est la suivante (fig. 1):

" Il établit pour toute l'année la somme des diagrammes jour-
" naliers de la charge et obtient de cette façon une courbe
" dont les ordonnés représentent la charge en KW., et l'abscisse
" correspondante à chaque ordonné représente le temps d'heures
" durant lesquelles cette charge a été atteinte ou dépassée
" (fig. 1). La superficie $OCMT$, limitée par la courbe ainsi ob-
" tenue, représente donc la totalité des KW-heures distribués
" dans le courant de l'année. Ceci dit, M. Schwabach décompose
" la charge maximum OC dans un certain nombre n de zones
" (5 dans la figure) et répartit sur ces différentes zones une
" certaine proportion K des frais totaux annuels fixes, c'est-à-
" dire indépendants de la quantité d'énergie produite. Il dit:
" Une première proportion des KW. de la charge dénommée a
" correspond à la somme A du total des frais K. Une portion
" successive b représente une partie B des frais, etc. En vue

Digitized by Google

" de simplifier, nous pourrons considérer les n zones comme
" étant de la même importance (en KW.) et répartir sur ces
" zones la totalité des frais K en n parts égales. Chaque KW-
" heure correspondra donc pour chacune des zones à un prix

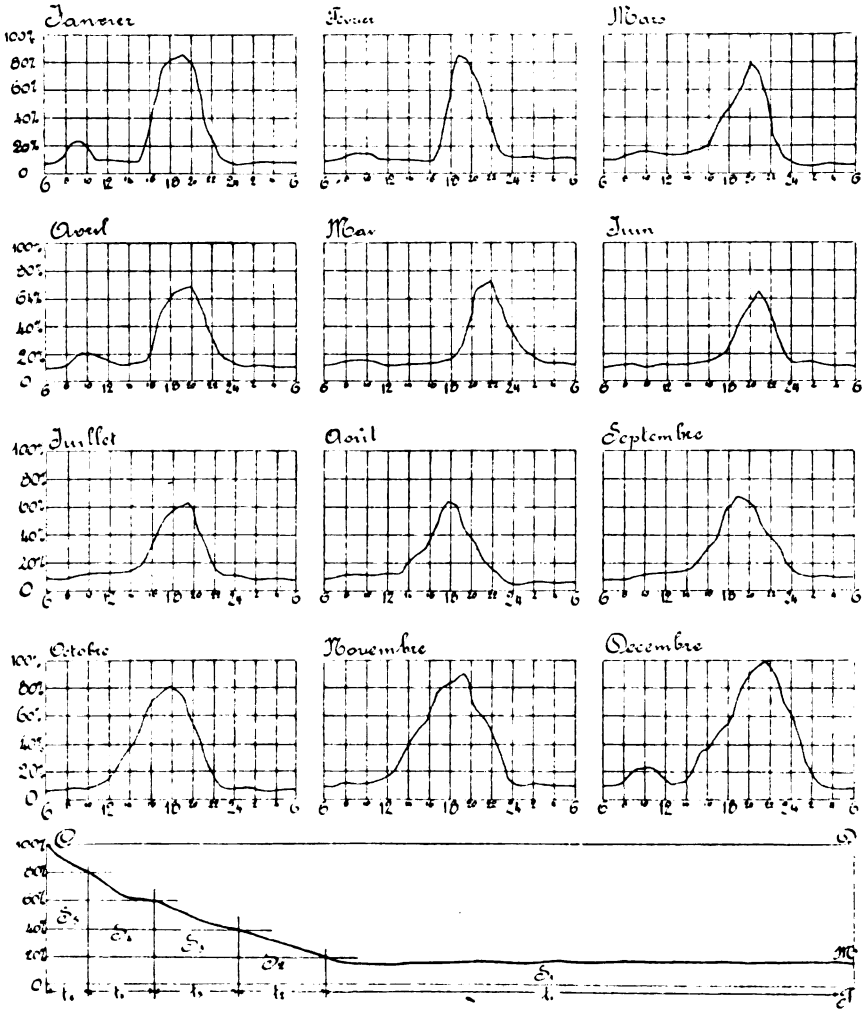


Fig. 1. — Courbes schématiques suivant Schwabach.

" de revient différent, parce que, au fur et à mesure que la
" charge augmente, les KW heures, sur lesquels les frais se répar
" tissent, diminuent. En divisant le diagramme en sections ver-
" ticales correspondantes aux différents degrés de charge, tels

Digitized by Google

" indiqués dans la figure, et en les dénommant respectivement " S_1, S_2.... (les superficies), t_1, t_2.... (les bases de ces sections), nous " trouverons facilement que le prix des KW-heures pour une " charge comprise, par exemple, dans la m^e zone serait indiqué " par l'expression:

$$\frac{t_m}{S_m}\left(\frac{1}{t_1+t_2+....+t_m+....t_n}+\frac{1}{t_2+....+t_m+....+t_n}+....+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{t_m+....+t_n}\right)\frac{K}{n}.$$

" Cette expression simplifiée, dans une certaine mesure, repré- " sente le résultat obtenu par M. Schwabach. Celui-ci d'ailleurs " fait observer comment, revenant du diagramme de la figure " au diagramme journalier dont celui-ci se compose, il est pos- " sible d'établir pour les différentes heures du jour et pour les " différentes saisons le prix de revient du KW-heure.

" M. Schwabach s'arrête à ce point et se limite à observer " d'une façon fort subtile: il est possible sur la base de cette " détermination et en connaissant la répartition de leur con- " sommation (par exemple: illumination de l'escalier, illumination " publique, etc.) qu'on puisse établir des prix spéciaux.

" Nous sommes en mesure de franchir une étappe importante " pour l'application pratique de la théorie Schwabach. En effet, " une fois le coût du KW-heure établi pour les différentes pé- " riodes de la journée et en tenant compte des pertes et frais de " distribution, il est logiquement permis de déterminer sur la base " de ce prix de revient le prix de vente, variable lui aussi, " suivant les heures de la journée et les différentes saisons. " Cette déduction directe serait d'ailleurs parfaitement inutile, " *s'il n'existait un appareil permettant l'application d'une façon* " *simple de divers tarifs aux débits trouvés pour les différentes* " *heures et saisons.*

" Cette possibilité est donnée par le Compteur à tarifs mul- " tiples, du système Baumann, lequel donc de la façon la plus " naturelle et la plus logique permet la solution du problème " de tarifs. Le procédé purement mathématique de Schwabach " destiné à déterminer les différents tarifs à appliquer enlève " tout ce qui, à première vue, pourrait paraître vague et ar- " bitraire dans le système des tarifs horaires multiples.

Digitized by Google

" Je conclus avec une observation fort simple qui saute aux " yeux en examinant le diagramme de la figure. La surface *OCMT* " représente l'énergie effectivement distribuée au courant de " l'année, tandis que le rectangle *OCDT* représente la quantité " d'énergie qui aurait pu être distribuée et qui, si effectivement " distribuée, aurait permis de vendre le KW-heure au prix le

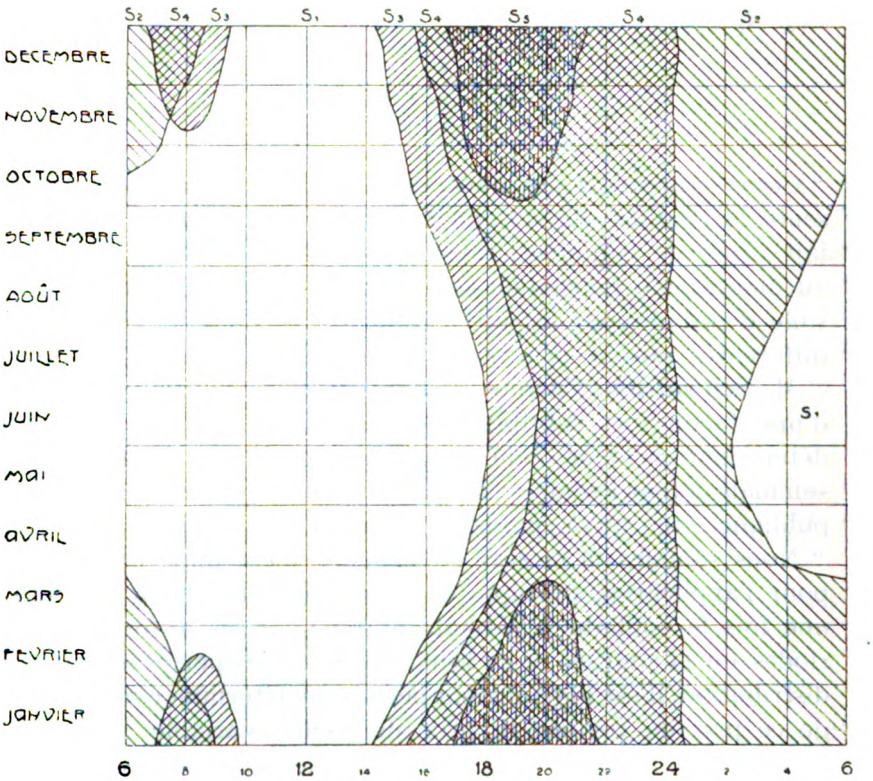


Fig. 2. — Calendrier du prix de revient d'après Schwabach.

" plus minime. Il faut donc que la vente des KW-heures *OCMT* " compense la portion non vendue, et la méthode usuelle con- " siste donc, en faisant abstraction de la côte-part des frais pro- " portionnelle aux KW-heures produits, à augmenter pour toute " la production le tarif minime sus-indiqué, et ceci dans la pro- " portion des surfaces $\frac{OCDT}{OCMT}$; de telle façon, comme on dit, " l'innocent paye pour le coupable. Une compensation peut se " faire par les lignes verticales c'est-à-dire en faisant payer

Digitized by Google

" chaque consommateur, comme s'il consommait le maximum. " De telle façon on arrive au système à forfait, pas toujours " applicable ou du moins pas aussi simple dans son application " qu'il pourrait paraître à première vue, attendu que les ma- " xima des différents consommateurs ne coïncident pas. Enfin " on peut faire une compensation par des lignes horizontales: " chaque KW. à une certaine hauteur de la charge payerait " comme s'il était consommé pendant toute l'année, et alors on " arrive à la methode indiquée par M. Schwabach pour le prix " de revient, soit au tarif multiple, qui seul par le moyen du " compteur-calculateur du système Baumann trouve une appli- " cation simple. Inutile d'ajouter, ceci se voit à première vue, " que par la méthode Schwabach on arrive à des tarifs élevés " pendant les heures de forte charge, et à des tarifs réduits pour " les heures de faible consommation; c'est-à-dire au dévelop- " pement de la consommation, lorsque la Centrale est peu " chargée, et à la restriction du débit, lorsque celle-ci est en " surcharge. Ceci ne s'obtient pas par la méthode des forfaits „.

Nous ajoutons le diagramme reconstitué d'après la méthode Schwabach et donnant la distribution des frais de production pendant toute l'année d'après leur calcul pour les différentes zones de charge. Un tel diagramme représente pour l'application du tarif multiple directement *le calendrier des tarifs* suivant heures et saisons pour toute l'année, et l'adaptation fidèle du tarif à ce diagramme donnera forcément le résultat le plus avantageux pour producteur et consommateur (fig. 2).

Avantages du tarif multiple.

Du moment donc que nous pouvons admettre que le principe des tarifs multiples repose sur une base théorique saine et que les éléments d'un semblable tarif peuvent être établis de façon précise correspondants exactement aux exigences du système de distribution et en présumant en outre qu'il existe un appareil simple, pratique et précis permettant un enregistrement suivant plusieurs tarifs différentiels, nous voulons examiner les avantages qu'un tel système pourrait présenter d'une part pour le consommateur, ce qui est équivalent avec l'extension de la vente de l'énergie, d'autre part pour la Centrale en vue de régulariser son débit.

Digitized by Google

Un système de tarifs différentiels multiples est:

Équitable, puisqu'il permet de faire payer au consommateur suivant des prix variant à peu près comme la valeur du service rendu, et puisqu'il sera rémunératif pour le producteur suivant les sacrifices et les dépenses que la clientèle lui impose. En outre ce système applique automatiquement et exactement le même prix à tous les abonnés consommants dans les mêmes conditions.

Simple, car en premier lieu ce service est rationnel et le public comprend sa raison d'être. Il suffit au consommateur de connaître la série des 4, 5, 6 ou 7 prix et l'horaire d'application de ceux-ci pour arranger sa consommation au mieux de ses intérêts. En admettant en outre que l'appareil calculera automatiquement la somme totale à payer, la confection des factures se trouve notablement simplifiée pour l'exploitant et facilement contrôlable pour le consommateur.

Claire, parce que toutes les indications pour la consommation peuvent être rendues apparentes sur l'appareil même, sans nécessité ni pour le consommateur, ni pour le producteur d'étudier pour l'établissement de la somme à payer des tableaux de tarifs, de rabais, de coefficient de consommation ou autre.

Commode, puisqu'il supprime toute surveillance de l'abonné, ce qui n'est pas le cas, même avec les systèmes de vente par compteurs ou enregistreurs, lorsque chez le même abonné il existe différents circuits pour les diverses applications faites à des conditions et prix différents et dont la répartition exige un fréquent contrôle. Avec le système à tarifs multiples un seul circuit principal de distribution suffit, et sur lui peuvent se brancher indistinctement tous les appareils récepteurs, éclairage, force motrice, chauffage, charge des accumulateurs sans que l'exploitant ait besoin de connaître l'usage fait de l'énergie et, par conséquent, de procéder à aucune inspection.

Le tarif multiple doit forcément avoir la plus grande influence sur le développement des applications d'électricité, non seulement pour l'introduction de l'éclairage électrique dans les appartements modestes, mais surtout pour l'application comme force motrice chez le petit industriel et l'agriculteur, comme force calorique à la cuisine, au repassage, au chauffage, rendus possibles pendant une partie de la journée grâce au prix modique du KW-heure.

Le tarif multiple permet naturellement aussi l'application de

Digitized by Google

rabais établis en pourcentage du total de la consommation, c'est-à-dire à la somme annuelle ou mensuelle payable par le consommateur. Le rabais devient alors un simple calcul commercial donnant un avantage au fort consommateur tout en lui imposant la même échelle de prix de base qu'aux petits acheteurs.

L'influence sur la production est celle d'un réglage automatique de la courbe de charge par l'abonné lui-même qui naturellement cherchera à réduire au strict nécessaire sa consommation pendant les heures de forte charge, c'est-à-dire de prix élevé en cherchant également à profiter autant que possible des périodes auxquelles il achète l'énergie à bon compte: les minima de débit subiront automatiquement un relèvement, la courbe aura une tendance à s'aplatir, la proportion d'utilisation du réseau deviendra plus favorable.

Nous ajoutons qu'un abonné désireux de jouir économiquement d'un éclairage de grand luxe, hors de prix avec un tarif à forfait ou à compteur simple, pourra toujours s'arranger pour que cet éclairage ne coïncide pas avec les heures de la charge maximum *commerciale*, c'est-à-dire avec les heures de prix élevé, en allumant ses lampes de salons après 8 ou 9 heures du soir seulement; il se procurera de cette façon, sans surcharge pour le réseau, à un prix moyen, un éclairage grandiose qui serait forcément ruineux avec un des tarifs cités plus haut.

Tarif multiple et taxation.

L'objection a été soulevée que dans les pays où l'énergie électrique subit une taxation différente suivant son application, la tarification multiple devient impossible; ceci n'est pas le cas, car de la façon la plus simple nous pouvons diviser la consommation aux fins de taxation *après* la tarification différentielle établissant les rapports entre le producteur et le consommateur. Nous n'avons qu'à introduire dans un des circuits un simple compteur enregistrant l'énergie absorbée par ce circuit. Il ne restera qu'à déduire le résultat de lecture de ce second compteur, de la lecture du compteur principal à tarifs multiples, pour établir la portion de l'énergie totale à laquelle l'une ou l'autre taxe s'applique.

Digitized by Google

Le Calculateur " Multarif „.

Ayant ainsi démontré l'avantage qu'il y aurait pour la distribution de l'énergie électrique par des tarifs différentiels multiples ainsi que la manière d'établir de façon précise les graduations de tarifs, il reste à décrire l'appareil qui permet de combiner de façon extrêmement simple ces différents désidératas et qui, par son application sur grande échelle, a donné des résultats concluants, non seulement pour son fonctionnement, mais aussi pour le principe des tarifs différentiels.

Les instruments en question constituent le dernier type d'exécution de l'appareil dénommé " Compteur-Calculateur d'électricité à tarifs multiples *Multarif*, système Baumann „ (plusieurs calculateurs à courant alternatif, triphasé et continu ainsi que plusieurs appareils à tarifs applicables à tout système de compteur électrique sont présentés à l'audience durant la communication).

Il s'agissait pour l'inventeur de combiner avec la minuterie d'un compteur ordinaire une seconde minuterie entraînée par la première et ceci suivant des rapports de multiplication variables, c'est-à-dire par un changement de vitesse. Ce changement de vitesse étant actionné par une horloge qui en opérait le déplacement au moyen d'un levier et d'une came profilée selon les exigences du tarif.

Après avoir passé par différents stages préparatoires, illustrés tous par une série de brevets ou de dépôts de modèles et se basant sur des systèmes avec roue à couronne, avec changement de vitesse à balladeur, comme d'une voiture automobile, avec levier à cliquet, etc., une exécution parfaitement simple et pratique a été le résultat de ce travail.

Principe de l'appareil.

Le schéma de fonctionnement ci-dessous représente le principe de l'appareil (fig. 3):

A indiquant le disque et l'arbre moteur d'un compteur quelconque (alternatif, triphasé, continu), celui-ci actionne de la façon ordinaire une minuterie intégrante à KW.-heures ou HW.-heures. Sur l'axe de cette minuterie serait calée une série d'engrenages *B*

Digitized by Google

tous du même diamètre et du même pas, mais ayant un nombre différent de dents par le fait que celles-ci auraient été rasées sur une partie de la circonférence plus ou moins grande de certains des engrenages. Une seconde minuterie, celle des prix,

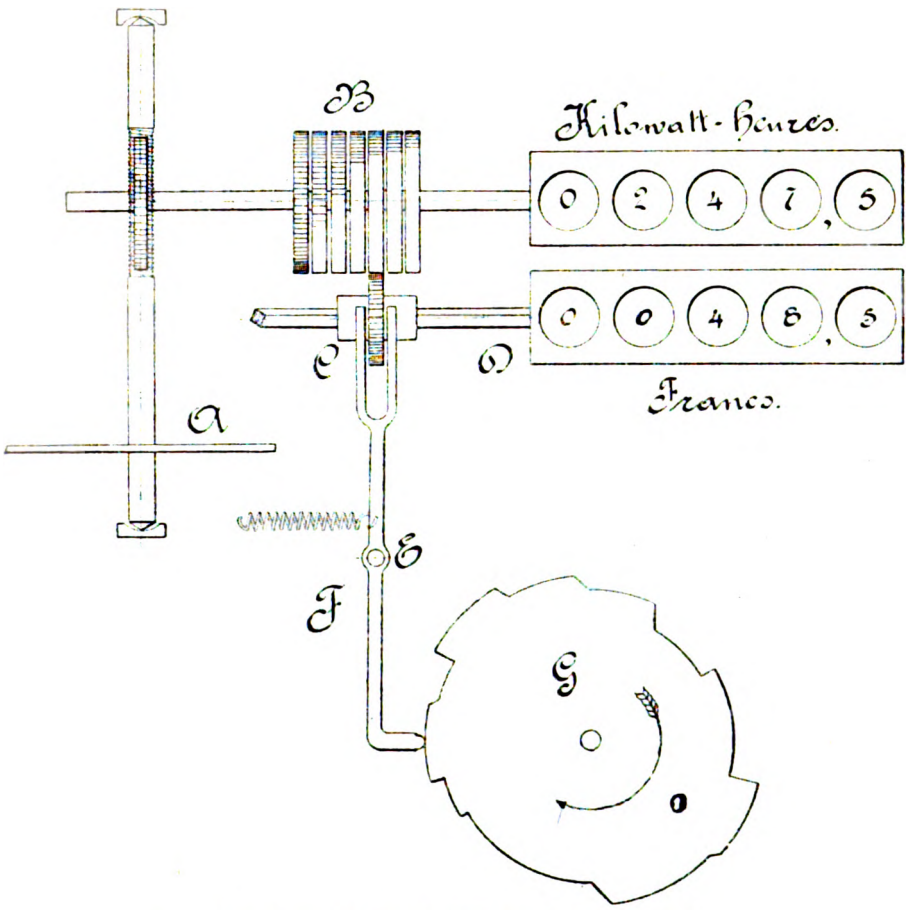


Fig. 3. — Schéma du compteur à tarif multiple.

serait entraînée par ces engrenages *B* au moyen d'un engrenage *D* pouvant se déplacer le long de son axe d'entraînement de façon à engrener avec l'un ou l'autre de la série des engrenages *B*. Cet engrenage *D* serait déplacé au moyen d'un levier *F* suivant les encoches d'une came *G*. Cette came, elle-même, actionnée par une horloge, ferait un tour complet en 24 heures. Il est naturel que la minuterie des prix sera entraînée par le

Digitized by Google

compteur, c'est-à-dire par les engrenages B en proportion du nombre des dents qui se trouveront sur l'engrenage vis à vis duquel le pignon D sera placé par la came de l'horloge.

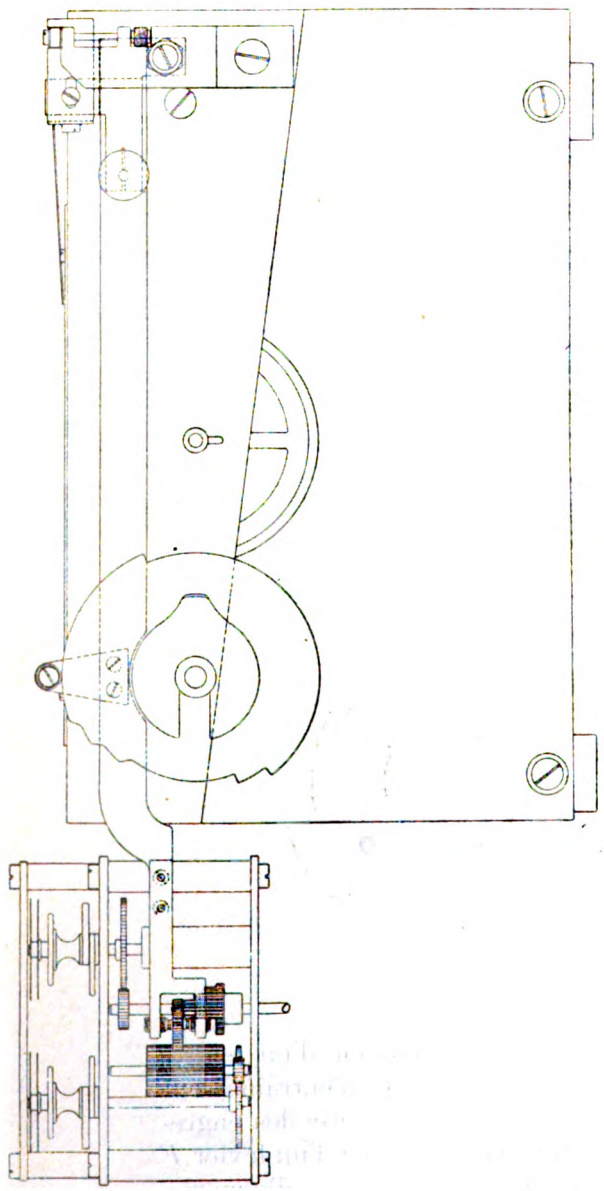


Fig. 4. — Horloge et Minuterie du Calculateur » Multarif » (vue de côté).

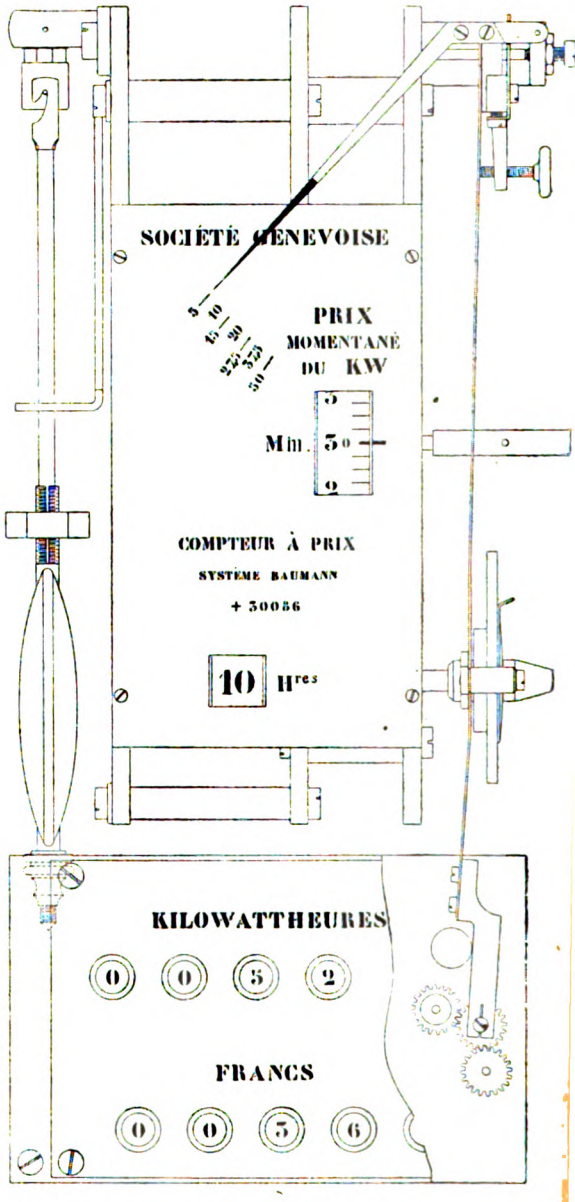


Fig. 5. — Horloge et Minuterie du Calculateur « Multarif » (vue de face).

Digitized by Google

Ce principe a été presque littéralement suivi dans l'exécution pratique illustrée sur les dessins ci-joints ainsi que sur le second schéma répondant à l'exécution effective (figg. 4, 5, 6).

Nous voyons que la série des engrenages B est obtenue simplement en découpant à une longueur plus ou moins grande les

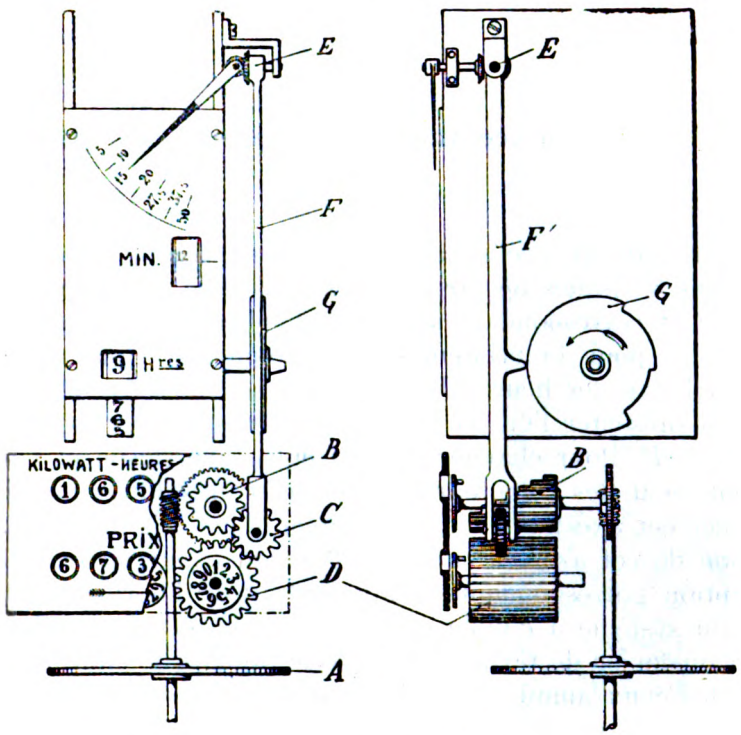


Fig. 6. — Schéma d'exécution du calculateur « Multarif ».

dents d'un simple pignon cylindrique intercalé entre l'axe principal du compteur et la minuterie des KW.-heures. Le pignon D, destiné à entraîner la minuterie des prix, n'est pas mobile lui-même, mais il engrène avec le pignon découpé B au moyen d'un troisième petit pignon C qui, lui-même, est porté au bout du long levier F. L'arc de cercle décrit par ce levier F est suffisamment grand pour permettre l'engrenage exact des trois pignons dans toutes les positions déterminées par les encoches de la came de tarif G. Cet arc de cercle limite donc évidemment la largeur des pignons B et D ainsi que le nombre des graduations appliquées au pignon B. Une longue pratique dans

Digitized by Google

la construction de l'appareil ainsi que des exigences de tarif ont amené à l'établissement du pignon *B* avec 20 dents et avec 7 graduations au maximum. C'est dans ces conditions que l'engrenage avec le petit pignon *C* se fait encore convenablement dans les différentes positions et que les rapports de multiplication entre les deux minuteries deviennent les plus simples.

Exécution de l'appareil.

Les premiers appareils placés dans le commerce par l'inventeur portaient 3 disques de tarif *G*, fixés sur l'axe des heures de la pendule et correspondant à 3 tarifs applicables l'un pour l'été, le second pour le printemps et l'automne, le troisième pour l'hiver. L'axe des heures de la pendule pouvait être déplacé de façon à présenter l'un ou l'autre des 3 disques vis à vis du nez du levier *F*. Pour changer le tarif entre une saison et l'autre, le contrôleur des compteurs n'avait qu'à introduire une clé et déplacer cet axe par un tour complet d'une vis de butée. La position de cet arbre à came était indiquée par un trait avec inscription correspondante sur le cadran de l'horloge. Celle-ci était du système à double cône avec câble entraîneur. La position du levier de tarif, c'est-à-dire le rapport de multiplication entre les deux minuteries, soit le tarif momentané, est indiqué sur le cadran de l'horloge par une aiguille indicatrice et un cadran des prix (fig. 6).

Le système avec 3 disques-tarif placés sur un axe mobile a été abandonné, et le changement du disque se fait actuellement par le remplacement intégral de celui-ci au moyen d'une fenêtre latérale du compteur; ce système empêche que le contrôleur chargé du changement de tarif puisse, soit par un oubli, soit par entente avec le consommateur, négliger le changement dont il est chargé. En remplaçant les disques, le contrôleur doit rapporter à la Centrale autant de pièces d'un tarif qu'il en a reçu d'un autre pour l'échange.

On pourra supposer que l'exactitude du compteur fût influencée suivant les différents tarifs appliqués, c'est-à-dire suivant l'entraînement plus ou moins rapide de la minuterie des prix.

Digitized by Google

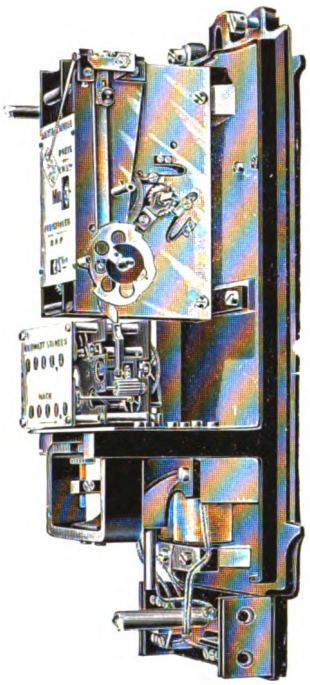


Fig. 7.

Calculateur à courant monophasé côté tarif (ouvert).

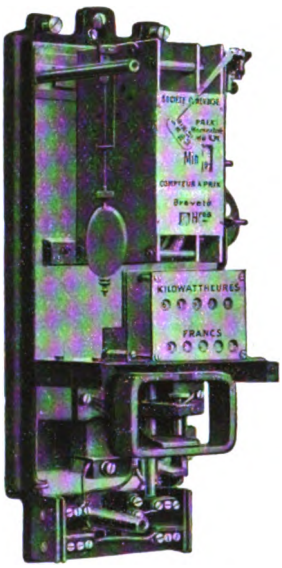


Fig. 8.

Calculateur à courant monophasé côté pendule (ouvert).

NEHER.

Digitized by Google

Fig. 9.

Calculateur à courant monophasé (fermé).

Fig. 10.

Calculateur à courant triphasé (fermé).

Digitized by Google

Les expériences ont démontré qu'un compteur disposant d'un couple suffisamment puissant, c'est-à-dire environ 8 à 10 gr. cm., n'était aucunement influencé par le fonctionnement de l'appareil à tarifs d'autant plus que les minuteries sont munies d'entraîneurs à contre-poids.

Ce système à tarifs, c'est-à-dire l'horloge avec la double minuterie, peut être combiné avec tout système de compteur monophasé, triphasé ou continu. En général les appareils actuellement dans le commerce et exécutés par la Société Genevoise pour la Construction d' Instruments de Physique et de Mécanique, à Genève, sont munis par celle-ci de ses propres compteurs monophasés et triphasés; par contre, pour les compteurs à courant continu, les moteurs, système Siemens, ont été plus généralement adoptés (figg. 7, 8, 9, 10).

La forme commerciale de l'appareil prévoit la combinaison des 3 éléments, compteur, horloge et minuterie, sur la même plaque de base et sous le même couvercle; toutefois une exécution à relais avec l'horloge séparée du compteur est envisagée par certains brevets de l'inventeur et, dans le même ordre d'idées, une application avec horloge centrale et changement électrique des tarifs par un système de fil pilote ou semblable, a été élaborée et mise à l'essai sur certains réseaux.

L'horloge.

La pendule à remontage à la main exécutée pour une marche continue de 40 jours, sans cône ni câble mais avec ressort à très grand développement, donne des résultats d'une exactitude surprenante due en partie à l'utilisation d'une tige de pendule absolument invariable à la température. Les expériences faites, par exemple, à la Station d'Étalonnage de Francfort s/M., ont donné une variation ne dépassant pas une minute dans un mois de marche. Il existe en outre un modèle à remontage électrique, et ceci pour tous les genres de courants. Ce remontage consiste, lui-même, en un petit moteur avec disque à induction pour les courants alternatifs et avec induit bobiné tournant dans un champ permanent pour les types à courants continus. Ce petit moteur, branché sur les bornes du compteur, n'absorbe qu'une

Digitized by Google

quantité infime d'énergie; il tourne continuellement tant que le compteur est sous tension. Il sert à remonter un petit barillet de l'horloge, suffisant pour la marche de celle-ci pendant 72 heures. Le moteur de remontage est disposé de façon à charger ce barillet plus rapidement qu'il ne se déroule, de façon à créer une réserve; cette réserve une fois atteinte, le petit moteur de remontage simplement échappe au moyen d'un embrayage élastique. Au cas donc où, pour une raison ou pour une autre, le débit d'énergie électrique est interrompu, l'horloge continuera à fonctionner au moyen de sa propre réserve pendant 3 jours entiers, et cette réserve se reconstituera dans un délai d'environ 3 jours également après que le courant sera rétabli. Il est à remarquer que le moteur de remontage pour courant continu n'a pas de contact de relai ou autre, il n'est donc pas exposé aux mêmes détériorations que certains appareils du même genre d'autre provenance.

Pour terminer la description des appareils, il nous reste à parler de la base, du couvercle et de la boîte de connexions.

La base est en fonte, très rigide, et ceci dans le but d'éviter toute possibilité de voilement qui pourrait nuire à l'alignement. En effet, l'expérience a démontré que certains compteurs à double tarif montés sur base en tôle estampée ou bien en zinc avaient en peu de temps indiqué de forts écarts de marche provenant uniquement d'une déformation de la base. Dans le compteur *Multarif* ce danger a été complètement écarté en sacrifiant, il est vrai, au poids de l'appareil.

Le couvercle de l'appareil constitue une des parties les plus difficiles pour le constructeur, car il faut que l'horloge ainsi que l'appareil à tarifs soient accessibles pour mise en marche, réglage, remontage et changement des tarifs et qu'en même temps ce couvercle soit autant que possible étanche et impénétrable. Dans les constructions présentées, la boîte du compteur porte des 2 côtés des volets à coulisse, celui de gauche donnant accès au pendule pour son placement et pour le réglage, tandis que celui de droite donne accès au remontage, réglage de l'horloge et au disque de tarif pour son échange. Les 2 couvercles sont plombés par le service électrique et ne peuvent être ouverts que par ses employés.

La boîte des connexions placée sous le compteur est entièrement étanche et munie d'un couvercle séparé également plombé par le service électrique.

Digitized by Google

Mise en marche et réglage.

La mise en marche des compteurs et des horloges, le réglage électrique et mécanique sont excessivement simples, et des instructions complètes sont fournies par le fabricant avec les appareils pour éviter tout tâtonnement ou fausse manœuvre. Les appareils étant livrés exactement calibrés, il suffit pour leur mis en service de placer le compteur exactement perpendiculairement moyennant un plomb appliqué aux repaires prévus et de le fixer dans cette position au moyen des vis de suspension et de repérage. Les connexions faites, le pendule de l'horloge est placé en ouvrant la porte de gauche, l'horloge est remontée et mise à l'heure par la porte de droite; enfin les 2 portes ainsi que le couvercle de la boîte des connexions sont plombées, et l'appareil se trouve régulièrement en service.

Échelle des tarifs réalisables.

Le choix des différents tarifs, tout en permettant une très grande variété, est cependant réglé par la disposition mécanique des minuteries. En nous reportant de nouveau à la figure schématique de l'appareil et à la description du principe, nous avons vu que le pignon des prix *B* était muni de 20 dents plus ou moins longues suivant différentes graduations.

La minuterie principale pourra donc entraîner celle des prix, soit par une, deux, trois, quatre.... jusqu'à vingt dents par tour. L'engrènement des différents pignons est réglé de telle façon, que la minuterie des prix avance exactement d'un nombre entier de dents et s'arrête dans une position permettant l'engrenage sans choc d'une nouvelle dent lorsque celle-ci vient à se présenter. Or il est à remarquer que pour obtenir cette précision, une dent du pignon *B* devra faire avancer la minuterie de 2 divisions de son engrenage, deux dents feront avancer de 3 divisions, 5 dents de 6 divisions, 18 dents de 19 divisions, tandis que la couronne complète de 20 dents ou incomplète de 19

Digitized by Google

dents imprimera à la minuterie des prix un mouvement régulier de 20 divisions par tour.

La multiplication la plus faible entre la minuterie du compteur et celle des prix sera donc de $^{2}/_{20}$, soit $^{1}/_{10}$, tandis que les multiplications intermédiaires pourront varier de 20e en 20e. Ci-après sont indiqués un certain nombre de tarifs possibles avec 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 .... jusqu'à 100 comme prix maximum du KW-heure.

Tableau des Tarifs:

½ -	¾ -	1 -	1¼ -	1½ -	1¾ -	2 -	2¼ -	2½ -	2¾ -	3 -	3¼ -	3½ -	3¾ -	4 -	4¼ -	4½ -	4¾ -	**5**
1 -	1½ -	2 -	2½ -	3 -	3½ -	4 -	4½ -	5 -	5½ -	6 -	6½ -	7 -	7½ -	8 -	8½ -	9 -	9½ -	**10**
2 -	3 -	4 -	5 -	6 -	7 -	8 -	9 -	10 -	11 -	12 -	13 -	14 -	15 -	16 -	17 -	18 -	19 -	**20**
3 -	4½ -	6 -	7½ -	9 -	10½ -	12 -	13½ -	15 -	16½ -	18 -	19½ -	21 -	22½ -	24 -	25½ -	27 -	28½ -	**30**
4 -	6 -	8 -	10 -	12 -	14 -	16 -	18 -	20 -	22 -	24 -	26 -	28 -	30 -	32 -	34 -	36 -	38 -	**40**[1]
5 -	7½ -	10 -	12½ -	15 -	17½ -	20 -	22½ -	25 -	27½ -	30 -	32½ -	35 -	37½ -	40 -	42½ -	45 -	47½ -	**50**[2]
6 -	9 -	12 -	15 -	18 -	21 -	24 -	27 -	30 -	33 -	36 -	39 -	42 -	45 -	48 -	51 -	54 -	57 -	**60**[3]
7 -	10½ -	14 -	17½ -	21 -	24½ -	28 -	31½ -	35 -	38½ -	42 -	45½ -	49 -	52½ -	56 -	59½ -	63 -	66½ -	**70**
8 -	12 -	16 -	20 -	24 -	28 -	32 -	36 -	40 -	44 -	48 -	52 -	56 -	60 -	64 -	68 -	72 -	76 -	**80**
9 -	13½ -	18 -	22½ -	27 -	31½ -	36 -	40½ -	45 -	49½ -	54 -	58½ -	63 -	67½ -	72 -	76½ -	81 -	85½ -	**90**
10 -	15 -	20 -	25 -	30 -	35 -	40 -	45 -	50 -	55 -	60 -	65 -	70 -	75 -	80 -	85 -	90 -	95 -	**100**[4]

[1] Strasbourg (Alsace).

[2] Carlsruhe, Brème, Francfort s.-M., Lausanne (Suisse).

[3] Wiesbade, Altenbourg (Saxe-Altenbourg).

[4] Carcassonne, Turin, Charlottenbourg, Pamplone, Barcelone, Séville, Straubing.

(Les tarifs prévus par ces villes se trouvent dans l'annexe I).

Digitized by Google

Le tarif lui-même sera donc fixé une fois pour toutes par le choix du prix maximum, c'est-à-dire par le choix des rapports d'engrenage des 2 minuteries. Comme chaque tarif présente 19 différents prix à choix déterminés par la longueur des dents du pignon des prix, il reste à choisir les 7 chiffres sur les 19 s'appliquant le mieux aux conditions du réseau.

Choix du Tarif.

En déterminant la distribution des prix choisis sur les 24 heures de la journée, il n'y a aucune nécessité d'appliquer tous les 7 prix. Au contraire, il sera avantageux de n'en appliquer que 4 ou 5 pour la même saison et de décaler la série entière des prix pour une autre saison.

Si, par exemple, nous appliquons les prix de 10, 20, 30, 50, 60 en été (choisis sur la série des prix de 10 à 100), il pourra être utile d'utiliser en hiver une échelle de 10, 20, 50, 60, 80.

Pour indiquer d'ailleurs la multiplicité des combinaisons possibles, nous faisons suivre un certain nombre de tarifs appliqués pour le compteur *Multarif* dans différents services électriques en partie pour l'exploitation régulière, en partie pour des essais comparatifs (voir: annexe).

Le tarif le plus rationnel pourra toujours être choisi d'après la méthode Schwabach en établissant sur la base des courbes de charge un calendrier de la distribution de charge pour toute l'année et en laissant une certaine marge pour la correction automatique de la courbe qui précisément se fera par l'application du compteur à tarifs multiples. Un exemple excellent pour la distribution rationnelle des tarifs est donné par les courbes de la ville de Lausanne, où avec 4 différents prix la courbe de charge et la courbe de tarifs se suivent presque exactement, et ceci au moyen de 3 tarifs différents, soit: hiver, printemps et automne, été (fig. 11, 12, 13).

Parmi les exemples de tarifs cités, il y en a plusieurs qui ont été établis de façon tout à fait empirique aux fins d'essai du compteur; mais partout où il s'agit d'exploitation régulière avec le compteur à tarifs multiples, les tarifs naturellement ont été soigneusement étudiés d'après les courbes de charge du réseau.

Digitized by Google

Service Électrique - Ville de Lausanne.

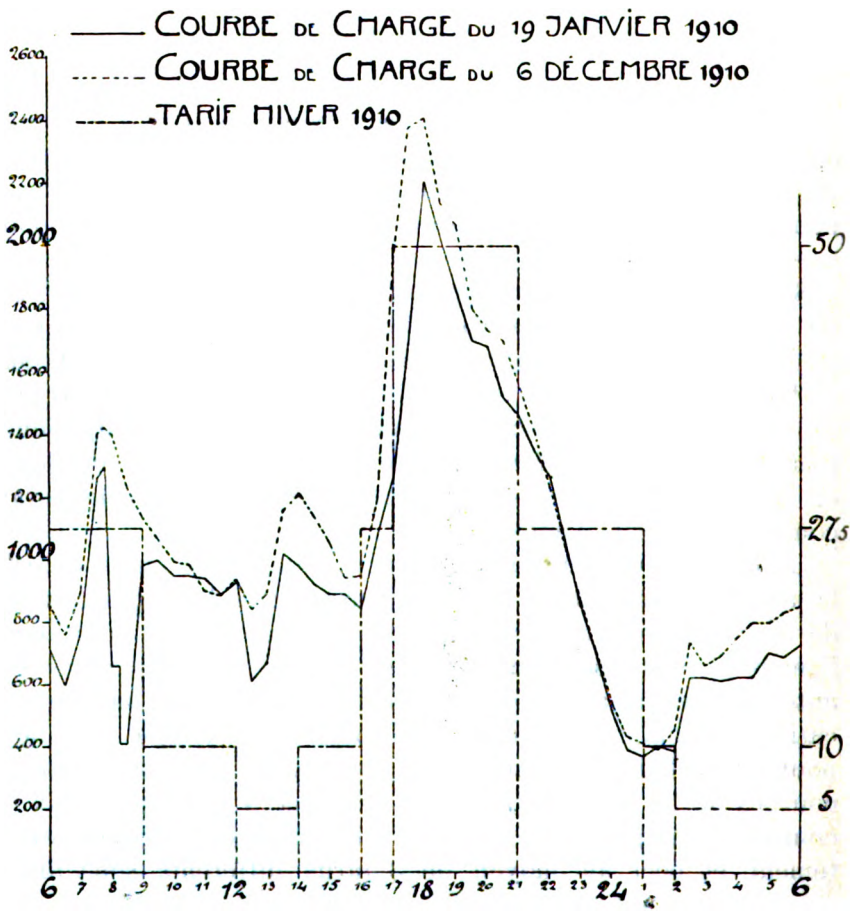


Fig. 11.

Digitized by Google

Service Électrique - Ville de **Lausanne.**

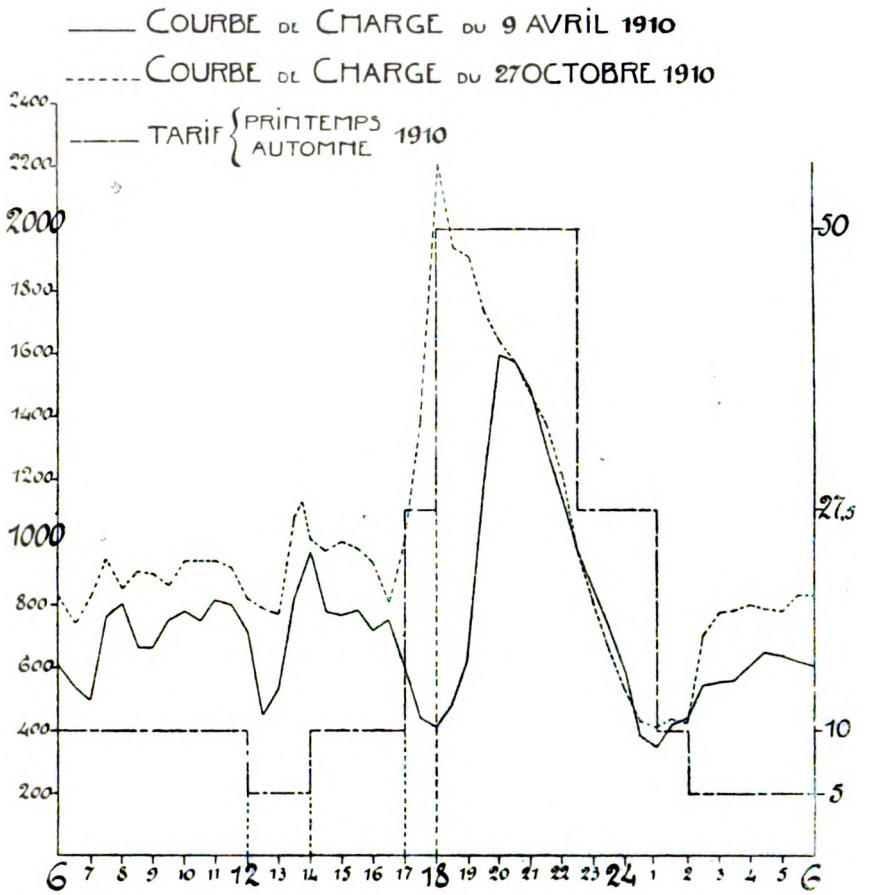


Fig. 12.

Digitized by Google

Service Électrique - Ville de Lausanne.

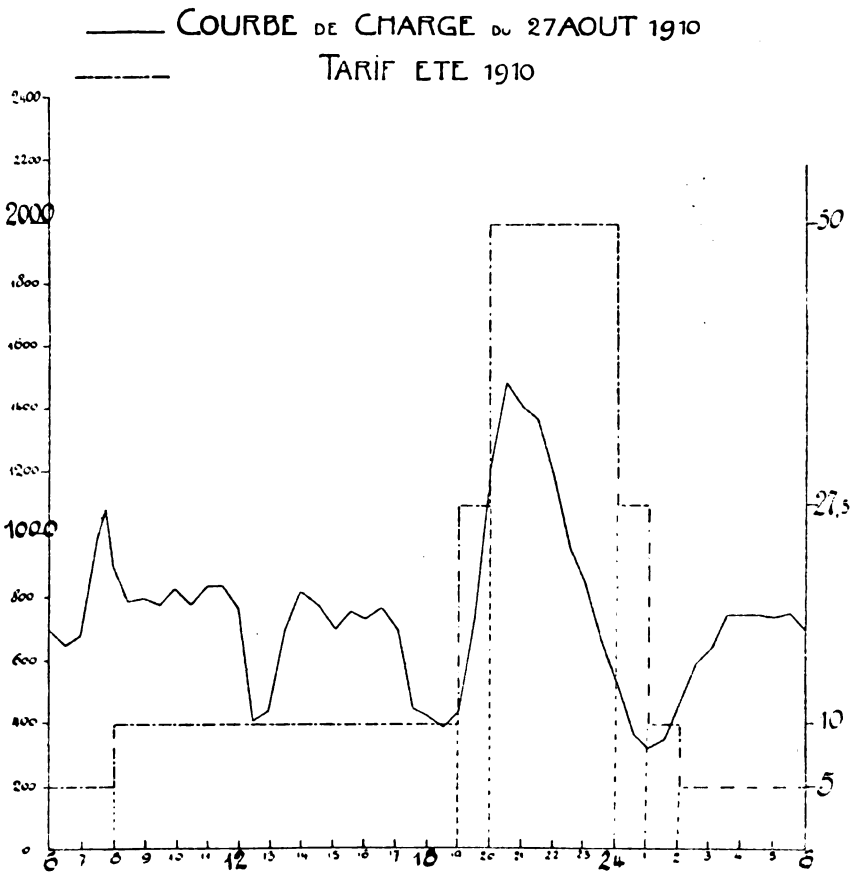


Fig. 13.

Digitized by Google

Résultats dans la pratique.

Quoique l'intérêt du système à tarifs multiples ait été reconnu depuis longtemps et que l'appareil permettant l'application du système existât depuis plusieurs années déjà et dans une exécution au-dessus de toute critique, le public intéressé, soit les producteurs d'énergie électrique, se sont montrés sceptiques et ont hésité devant l'application sur une grande échelle, effrayés par le prix d'installation de l'appareil relativement coûteux et plus cher naturellement que les compteurs ordinaires, et attendant toujours la publication des résultats pratiques d'une application sur grande échelle.

En effet, il était connu que la ville de Lausanne sur recommandations et d'après les études approfondies du vaillant directeur de son service électrique municipal, Monsieur de Montmollin, avait pris les devants et avait introduit le système de distribution à tarifs multiples avec compteur *Multarif* sur une vaste échelle.

Les résultats pratiques de cette innovation tardaient à devenir publics, et ce n'est que dans le courant de cette année 1911, c'est-à-dire après 4 ans réguliers de l'application du système que les résultats concluants ont été communiqués.

Nous donnons un bref aperçu de ces résultats complétés par une figure de diagramme.

Le tarif multiple à Lausanne.

Les services électriques de Lausanne peu satisfaits du coefficient d'utilisation de leurs installations, surchargées pendant quelques heures de la journée, et fort peu utilisées pendant une grande période de l'année, cherchaient des 1906 un moyen de populariser l'utilisation de l'énergie électrique et de mieux répartir la charge sur les 24 heures.

Une étude serrée sur la base du système à tarifs multiples démontra que celui-ci donnerait de la façon la plus directe les résultats espérés pourvu qu'un appareil pratique et simple fût trouvé pouvant s'appliquer aux exigences complexes d'un tel système. L'appareil *Multarif* inventé par Monsieur l'ingénieur A. Baumann et perfectionné par la Société Genevoise pour la Construction d'Instruments de Physique et de Mécanique, à

Digitized by Google

Genève, l'emporta facilement sur d'autres solutions plus compliquées et moins rationnelles du problème, et grâce à l'insistance de Monsieur de Montmollin, le tarif multiple fut décidé, du moins provisoirement pour les abonnés importants, tandis que pour les petites installations un compteur ordinaire avec appareil à maximum, système Wright, fut prévu.

Le tarif adopté variait de 5 à 50 centimes par KW-heure, et le règlement admettait le décalage du tarif pour les 4 saisons de l'année.

Dans la première période de 1906 au 31 décembre 1907, il fut installé 1498 compteurs *Multarif*, sur un total prévu de 1600 appareils pour tout le réseau.

Malgré une certaine méfiance du public, malgré l'inexpérience des employés techniques qui, au commencement, trouvèrent naturellement des difficultés pour l'installation et le réglage des appareils, le succès du système s'établit très rapidement. Le public comprit l'avantage à répartir sa consommation de courant suivant la distribution du tarif, il apprécia rapidement la possibilité d'avoir de l'énergie à bon marché et installa des petits moteurs, ventilateurs, aspirateurs pour le nettoyage par le vide, des appareils de chauffage, de cuisine, des fers à repasser, etc... alimentés pendant les heures de courant à bon marché.

Les appareils fonctionnant avec une régularité dépassant toute attente, et le seul grand défaut redouté, celui de l'arrêt des horloges, étant, pour ainsi dire, inconnu, non seulement toute méfiance des consommateurs disparut, mais encore les abonnés, même de petites installations, exigèrent-ils l'appareil *Multarif*, et ceci malgré le prix de location mensuelle beaucoup plus élevé que celui du compteur ordinaire.

Le résultat fut donc une application sur beaucoup plus vaste échelle, de sorte que le nombre des appareils atteignit:

Fin	1908	2835	Compteurs *Multarif.*
„	1909	3805	Id.
„	1910	4952	Id.
Été	1911	env. 5200	Id.

Résultats économiques à Lausanne.

Les résultats économiques sont encore beaucoup plus frappants:

Digitized by Google

Le coefficient d'utilisation qui se chiffrait en:

1908	à	2665	heures	monta en
1909	à	2750	„	pour atteindre en
1910	le chiffre de	2805	„	

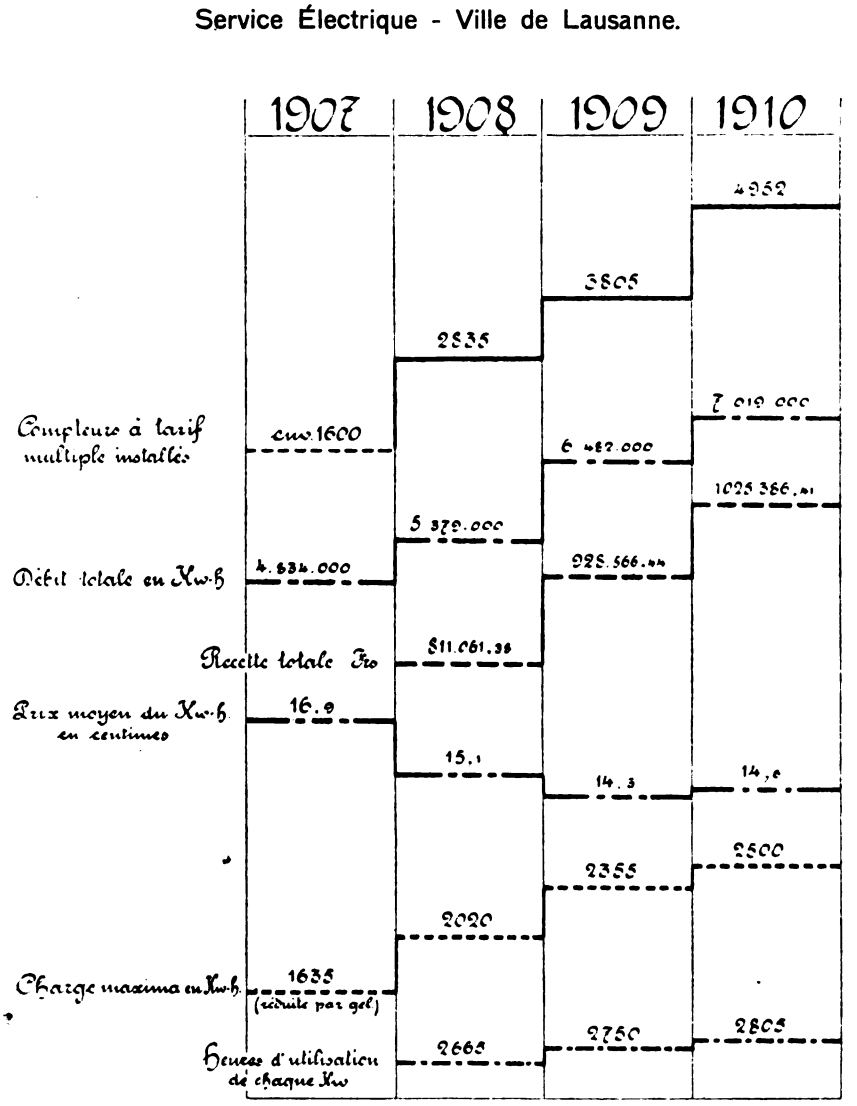


Fig. 14. — Graphiques de l'Exploitation à tarif multiple.

Digitized by Google

La vente d'énergie électrique indique la progression suivante:

Fourniture d'énergie en:		*Recettes correspondantes:*	
1908	5 379 000 KW-heures.	Francs:	811 061,38
1909	6 482 000 id.	id.	926 566,44
1910	7 019 000 id.	id.	1 025 386,41.

Cette augmentation de recettes de plus de 26 % en 2 ans fut atteinte malgré une diminution du prix de vente moyen par KW.-heure de 16,9 centimes en 1907 à 14,6 centimes en 1910, c'est-à-dire de 2,3 centimes en moyenne par KW.-heure.

Enfin, les installations des services électriques de Lausanne étaient à peu près complètement chargées avant l'introduction du tarif multiple; elles ont fait face à l'augmentation de plus de 30 % de production annuelle d'énergie grâce à l'introduction du nouveau système de tarification (fig. 14).

Quoiqu'on puisse regretter dans cette application de Lausanne le choix d'un prix inférieur trop bas (5 centimes par KW.-heure) et la faculté que possèdent par contrat certains gros consommateurs d'énergie de charger leur batterie de nuit précisément au prix de Fr. 0,05 (la charge de batterie se voit nettement sur le diagramme vers 2 heures du matin), nous devons féliciter Monsieur de Montmollin de son entreprise qui, au début, parut hardie à beaucoup de ses collégues. Les résultats obtenus lui ont donné entièrement raison, et le service électrique de Lausanne est devenu une source de grands bénéfices pour la ville, grâce à la courageuse initiative de son Directeur (voir annexe 2).

Conclusion.

Nous avons cherché à démontrer en comparaison avec les autres tarifs les avantages qu'aurait pour le producteur comme pour le consommateur l'application de tarifs multiples qui peuvent s'établir de la manière la plus exacte par des procédés mathématiques.

Nous avons présenté un appareil qui a permis de résoudre le problème de la façon la plus simple, et qui a fait ses preuves dans la pratique.

Nous avons enfin exposé les résultats obtenus avec ce système dans une grande exploitation dont la rentabilité a bénéficié de façon frappante par l'application du système à tarifs multiples.

Digitized by Google

Nous croyons donc qu'aucun obstacle sérieux puisse s'opposer à ce nouveau système de tarification, ne fût-ce éventuellement la concurrence des fabricants d'appareils compteurs qui naturellement s'opposeront de force à une révolution de tarif. Nous croyons que même cette objection pourrait être éliminée grâce à la possibilité d'appliquer le système à tarifs multiples aux compteurs de différentes fabrications et grâce à la simplicité de l'appareil qui pourra toujours être produit au moins aussi économiquement que les compteurs à double tarif.

En terminant nous désirons remercier tout spécialement tous ceux qui nous ont permis de présenter à un public choisi cette communication, notamment Monsieur l'Ingénieur G. Semenza, secrétaire général du Congrès des Applications électriques de Turin, Monsieur le Docteur O. Gualerzi et Monsieur l'Ingénieur L. Brandon qui ont contribué par d'intéressantes communications à ce rapport, et la Société Genevoise pour la Construction d'Instruments de Physique et de Mécanique, qui aimablement a mis à notre disposition une partie des appareils présentés au Congrès.

Annexe I — Tableau de tarifs.

Service électrique de la commune de Lausanne.

5, 10, 15, 20, 27.5, 37.5, 50 centimes le KW.-heure.

HIVER.

De 6 à 9 heures du matin	27,5	cms.
„ 9 heures du matin à midi	10	„
„ midi à 2 heures du soir	5	„
„ 2 à 4 heures du soir	10	„
„ 4 à 5 „ „ „	27,5	„
„ 5 à 9 „ „ „	50	„
„ 9 heures du soir à 1 heure du matin	27,5	„
„ 1 heure à 2 heures du matin	10	„
„ 2 à 6 heures du matin	5	„

Digitized by Google

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 heures du matin à midi	10	cms.
„	midi à 2 heures du soir	5	„
„	2 à 5 heures du soir	10	„
„	5 à 6 „ „ „	27,5	„
„	6 à 10 „ „ „	50	„
„	10 heures du soir à 1 heure du matin	27,5	„
„	1 heure à 2 heures du matin	10	„
„	2 à 6 heures du matin	5	„

ÉTÉ.

De	6 à 8 heures du matin	5	cms.
„	8 heures du matin à 7 heures du soir	10	„
„	7 à 8 heures du soir	27,5	„
„	8 heures du soir à minuit	50	„
„	minuit à 1 heure du matin	27,5	„
„	1 heure à 2 heures du matin	10	„
„	2 à 6 heures du matin	5	„

Service électrique municipal de Carlsruhe.

5, 10, 15, 20, 27.5, 37.5, 50 Pfg. le KW.-heure.

HIVER.

De	6 à 8 heures du matin	37,5	Pfg.
„	8 heures du matin à 4 heures du soir	27,5	„
„	4 à 8 heures du soir	50	„
„	8 heures du soir à minuit	37,5	„
„	minuit à 6 heures du matin	27,5	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 à 8 heures du matin	20	Pfg.
„	8 heures du matin à 4 heures du soir	10	„
„	4 à 8 heures du soir	50	„
„	8 heures du soir à minuit	37,5	„
„	minuit à 6 heures du matin	27,5	„

ÉTÉ.

De	6 heures du matin à 5 heures du soir	10	Pfg.
„	5 à 6 heures du soir	27,5	„
„	6 à 10 „ „ „	50	„
„	10 à 11 „ „ „	27,5	„
„	11 heures du soir à minuit	10	„
„	minuit à 6 heures du matin	5	„

Digitized by Google

Société des Services électriques de Strasbourg (Als.).

8, 12, 30, 40 Pfg. le KW.-heure.

HIVER.

De	6 à 9 heures du matin	30 Pfg.
„	9 heures du matin à 4 heures du soir	12 „
„	4 à 5 heures du soir	30 „
„	5 à 8 „ „ „	40 „
„	8 à 11 „ „ „	30 „
„	11 heures du soir à 6 heures du matin	8 „

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 heures du matin à 6 heures du soir	12 Pfg.
„	6 à 8 heures du soir	40 „
„	8 à 11 „ „ „	30 „
„	11 heures du soir à 6 heures du matin	8 „

ÉTÉ.

De	6 heures du matin à 8 heures du soir	12 Pfg.
„	8 à 11 heures du soir	30 „
„	11 heures du soir à 6 heures du matin	8 „

Service électrique municipal de Francfort s/M.

5, 10, 15, 20, 25, 35, 50 Pfg. le KW.-heure.

De	6 heures du matin à 4 heures du soir	25 Pfg.
„	4 à 6 heures du soir	35 „
„	6 à 8 „ „ „	50 „
„	8 à 11 „ „ „	35 „
„	11 heures du soir à minuit	25 „
„	minuit à 6 heures du matin	10 „

Service électrique municipal di Wiesbaden.

15, 30, 60 Pfg. le KW.-heure.

HIVER.

De	6 à 9 heures du matin	30 Pfg.
„	9 heures du matin à 4 heures du soir	15 „
„	4 à 6 heures du soir	60 „
„	8 heures du soir à minuit	30 „
„	minuit à 6 heures du matin	15 „

Digitized by Google

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De 6 à 9 heures du matin	30	Pfg.
„ 9 heures du matin à 6 heures du soir	15	„
„ 6 à 8 heures du soir	60	„
„ 8 heures du soir à minuit	30	„
„ minuit à 6 heures du matin	15	„

ÉTÉ.

De 6 à 9 heures du matin	30	Pfg.
„ 9 heures du matin à 7 heures du soir	15	„
„ 7 à 8 heures du soir	60	„
„ 8 heures du soir à minuit	30	„
„ minuit à 6 heures du matin	15	„

Service électrique de Carcassonne.

15, 25, 40, 50, 70, 80, 100 centimes le KW.-heure.

HIVER.

De 6 à 8 heures du matin	50	cms.
„ 8 à 10 „ „ „	80	„
„ 10 heures du matin à 3 heures du soir	40	„
„ 3 à 4 heures du soir	70	„
„ 4 à 10 „ „ „	100	„
„ 10 heures du soir à 6 heures du matin	50	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De 6 à 8 heures du matin	80	cms.
„ 8 heures du matin à 5 heures du soir	40	„
„ 5 à 6 heures du soir	70	„
„ 6 à 10 „ „ „	100	„
„ 10 heures du soir à 6 heures du matin	50	„

ÉTÉ.

De 6 heures du matin à 7 heures du soir	40	cms.
„ 7 à 8 heures du soir	70	„
„ 8 à 10 „ „ „	100	„
„ 10 heures du soir à 3 heures du matin	50	„
„ 3 à 5 heures du matin	80	„
„ 5 à 6 „ „ „	40	„

Digitized by Google

Service électrique municipal Altenbourg (Saxe-Altenbourg).

9, 12, 15, 24, 30, 45, 60 Pfg. le KW.-heure.

HIVER.

De	6 à 9 heures du matin	30	Pfg.
„	9 heures du matin à 4 heures du soir	15	„
„	4 à 8 heures du soir	60	„
„	8 à 11 „ „ „	45	„
„	11 heures du soir à 6 heures du matin	9	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 à 9 heures du matin	24	Pfg.
„	9 heures du matin à 4 heures du soir	12	„
„	4 à 8 heures du soir	60	„
„	8 à 11 „ „ „	30	„
„	11 heures du soir à 6 heurs du matin	9	„

ÉTÉ.

De	6 heures du matin à 4 heures du soir	12	Pfg.
„	4 à 6 heures du soir	24	„
„	6 à 8 „ „ „	60	„
„	8 à 11 „ „ „	30	„
„	11 heures du soir à 6 heures du matin	9	„

Société Piemontèse d'électricité de Turin.

10, 15, 25, 35, 50, 60, 75 centimes le KW.-heure.

De	6 heures du matin à midi	25	cms.
„	midi à 4 heures du soir	35	„
„	4 à 8 heures du soir	75	„
„	8 heures du soir à minuit	60	„
„	minuit à 6 heures du matin	15	„

Service électrique municipal de Brème.

20, 30, 40, 50 Pfg. le KW.-heure.

HIVER.

(Novembre, décembre, janvier).

De	6 à 9 heures du matin	40	Pfg.
„	9 heures du matin à 4 heures du soir	20	„

Digitized by Google

De 4 à 9 heures du soir	50	Pfg.
„ 9 heures du soir à minuit	40	„
„ minuit à 6 heures du matin	30	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.
(Février, mars, avril; septembre, octobre).

De 6 heures du matin à 6 heures du soir	20	Pfg.
„ 6 à 9 heures du soir	50	„
„ 9 heures du soir à minuit	40	„
„ minuit à 6 heures du matin	30	„

ÉTÉ.
(Mai, juin, juillet, août).

De 6 heures du matin à 8 heures du soir	20	Pfg.
„ 8 „ „ soir à minuit	40	„
„ minuit à 6 heures du matin	30	„

Service électrique municipal de Charlottenbourg.
10, 15, 20, 25, 30, 45, 60 Pfg. le KW.-heure.

HIVER.

De 6 à 8 heures du matin	30	Pfg.
„ 8 heures du matin à 4 heures du soir	15	„
„ 4 à 5 heures du soir	45	„
„ 5 à 8 „ „ „	60	„
„ 8 à 11 „ „ „	30	„
„ 11 heures du soir à minuit	25	„
„ minuit à 4 heures du matin	10	„
„ 4 à 6 heures du matin	30	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De 6 à 8 heures du matin	30	Pfg.
„ 8 heures du matin à 4 heures du soir	15	„
„ 4 à 6 heures du soir	45	„
„ 6 à 8 „ „ „	60	„
„ 8 à 11 „ „ „	30	„
„ 11 heures du soir à minuit	25	„
„ minuit à 4 heures du matin	10	„
„ 4 à 6 heures du matin	30	„

Digitized by Google

ETÉ.

De	6 heures du matin à 6 heures du soir	15	Pfg.
„	6 à 8 heures du soir	30	„
„	8 à 11 „ „ „	45	„
„	11 heures du soir à minuit	25	„
„	minuit à 6 heures du matin	10	„

Service électrique de MM. Mujica, Avellano & C.ie à Pamplone.

10, 15, 25, 40, 60, 80, 100 centimes le KW.-heure.

HIVER.

De	6 à 8 heures du matin	40	cent.
„	8 heures du matin à midi	25	„
„	midi à 2 heures du soir	15	„
„	2 à 4 heures du soir	25	„
„	4 à 5 „ „ „	40	„
„	5 à 9 „ „ „	60	„
„	9 à 11 „ „ „	40	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	25	„
„	1 heure à 5 heures du matin	10	„
„	5 à 6 heures du matin	40	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 à 7 heures du matin	40	cent.
„	7 heures du matin à midi	25	„
„	midi à 2 heures du soir	15	„
„	2 à 5 heures du soir	25	„
„	5 à 6 „ „ „	40	„
„	6 à 9 „ „ „	60	„
„	9 à 11 „ „ „	40	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	25	„
„	1 heure à 5 heures du matin	10	„
„	5 à 6 heures du matin	40	„

ÉTÉ.

De	6 heures du matin à midi	25	cent.
„	midi à 2 heures du soir	15	„
„	2 à 6 heures du soir	25	„
„	6 à 7 „ „ „	40	„
„	7 à 9 „ „ „	60	„
„	9 à 11 „ „ „	40	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	25	„

Digitized by Google

De	1 heure à 4 heures du matin	10	cent.
„	4 à 5 heures du matin	40	„
„	5 à 6 „ „ „	25	„

Compagnie Catalane d'électricité à Barcelone.

15, 20, 25, 30, 35, 45, 60 centimes le KW.-heure.

Hiver.

De	6 heures du matin à midi	25	cent.
„	midi à 2 heures du soir	20	„
„	2 à 4 heures du soir	25	„
„	4 à 6 „ „ „	30	„
„	6 à 9 „ „ „	60	„
„	9 à 11 „ „ „	45	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	30	„
„	1 heure à 6 heures du matin	15	„

Printemps — Automne.

De	6 heures du matin à midi	25	cent.
„	midi à 2 heures du soir	20	„
„	2 à 5 heures du soir	25	„
„	5 à 7 „ „ „	30	„
„	7 à 9 „ „ „	60	„
„	9 à 11 „ „ „	45	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	30	„
„	1 heure à 5 heures du matin	15	„

Été.

De	6 heures du matin à midi	25	cent.
„	midi à 2 heures du soir	20	„
„	2 à 6 heures du soir	25	„
„	6 à 7 „ „ „	30	„
„	7 à 10 „ „ „	60	„
„	10 heures du soir à minuit	45	„
„	minuit à 2 heures du matin	30	„
„	2 à 6 heures du matin	15	„

Compagnie Séville d'électricité à Séville.

15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 cent. le KW.-heure.

Hiver.

De	6 à 7 heures du matin	40	cent.
„	7 à 8 „ „ „	30	„

Digitized by Google

De	8 heures du matin à midi	25	cent.
„	midi à 2 heures du soir	20	„
„	2 à 4 heures du soir	25	„
„	4 à 5 „ „ „	30	„
„	5 à 9 „ „ „	50	„
„	9 à 11 „ „ „	40	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	30	„
„	1 heure à 5 heures du matin	20	„
„	5 à 6 heures du matin	30	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 à 7 heures du matin	40	cent.
„	7 à 8 „ „ „	30	„
„	8 heures du matin à midi	25	„
„	midi à 2 heures du soir	20	„
„	2 à 5 heures du soir	25	„
„	5 à 6 „ „ „	30	„
„	6 à 10 „ „ „	50	„
„	10 heures du soir à minuit	40	„
„	minuit à 2 heures du matin	30	„
„	2 à 4 heures du matin	20	„
„	4 à 6 „ „ „	30	„

ÉTÉ.

De	6 heures du matin à midi	25	cent.
„	midi à 2 heures du soir	20	„
„	2 à 6 heures du soir	25	„
„	6 à 7 „ „ „	30	„
„	7 à 11 „ „ „	50	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	40	„
„	1 heure à 2 heures du matin	30	„
„	2 à 4 heures du matin	20	„
„	4 à 5 „ „ „	30	„
„	5 à 6 „ „ „	40	„

Service électrique municipal de Straubing (Bavière).

10, 15, 20, 25, 30, 45, 55 Pfg. le KW.-heure.

HIVER.

De	6 à 8 heures du matin	30	Pfg.
„	8 heures du matin à 4 heures du soir	15	„
„	4 à 5 heures du soir	45	„
„	5 à 8 „ „ „	55	„
„	8 à 11 „ „ „	30	„

Digitized by Google

De	11 heures du soir à minuit	25	Pfg.
„	minuit à 4 heures du matin	15	„
„	4 à 6 heures du matin	30	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 à 8 heures du matin	30	Pfg.
„	8 heures du matin à 4 heures du soir	15	„
„	4 à 6 heures du soir	45	„
„	6 à 8 „ „ „	55	„
„	8 à 11 „ „ „	30	„
„	11 heures du soir à minuit	25	„
„	minuit à 4 heures du matin	15	„
„	4 à 6 heures du matin	30	„

ÉTÉ.

De	6 heures du matin à 6 heures du soir	15	Pfg.
„	6 à 8 heures du soir	30	„
„	8 à 11 „ „ „	45	„
„	11 heures du soir à minuit	25	„
„	minuit à 6 heures du matin	15	„

Service électrique municipal de Brandis s/E.

14, 25, 30, 40, 55, 70, 100 Hellers le KW.-heure.

HIVER.

De	6 à 9 heures du matin	40	Hellers
„	9 heures du matin à 4 heures du soir	30	„
„	4 à 8 heures du soir	70	„
„	8 à 11 „ „ „	55	„
„	11 heures du soir à 1 heure du matin	25	„
„	1 heure à 5 heures du matin	15	„
„	5 à 6 heures du matin	25	„

PRINTEMPS — AUTOMNE.

De	6 heures du matin à 6 heures du soir	30	Hellers
„	6 à 8 heures du soir	70	„
„	8 à 11 „ „ „	40	„
„	11 heures du soir à 5 heures du matin	15	„
„	5 à 6 heures du matin	30	„

Digitized by Google

ÉTÉ.

De	6 heures du matin à 7 heures du soir	30	Hellers
„	7 à 9 heures du soir	55	„
„	9 à 10 „ „ „	40	„
„	10 heures du soir à minuit	25	„
„	minuit à 5 heures du matin	15	„
„	5 à 6 heures du matin	30	„

Annexe II.

Lorsque ce travail était déjà sous presse, nous avons pu nous procurer les résultats de l'exploitation avec les calculateurs *Multarif* à Lausanne pendant l'exercice 1911, et plus particulièrement des données fort intéressantes sur les frais d'entretien annuel. Nous les faisons suivre, pour compléter notre relation précédente.

Le nombre de calculateurs *Multarif* installés à Lausanne atteignit, à fin 1911, le chiffre de 6400.

Le coefficient des heures d'utilisation a baissé à 2635, parce que beaucoup des nouveaux abonnements ont été faits en automne et n'ont influencé que la charge maximum de l'hiver sans augmenter la charge d'été.

Le total des Kw.-heures fournis en 1911 a atteint le chiffre de 7.744.100, correspondant à une recette de Frs. 1.099.720,17 (soit une augmentation de $7\,^1/_2\,\%$).

La progression des Kw. installés depuis l'introduction du calculateur *Multarif* indique les chiffres suivants:

Année	Kw. installés à Multarif	Kw. installés à compteur simple et appareil Wright
1908	4266	614
1909	5167	656
1910	7138	801
1911	9431	831

Presque *toutes* les nouvelles installations, même les plus petites, se font sur demande de l'abonné, à calculateur *Multarif*.

Les frais d'entretien s'établissent comme suit:

Digitized by Google

Renseignements sur les frais d'entretien des compteurs *Multarif* à Lausanne (à fin 1910)
reçus da Mr. Moutmellin le 20 février 1911.

(*Voir aussi rapport officiel d'exploitation, pag. 97, 1910*).

Compteurs *Multarif* installés	4952 —	
Coût d'entretien, 1 contrôleur et de relevée 1 employé	Frs. 5380 —	
Entretien et pose	„ 7936,20	
Pose nouveaux compteurs	„ 7268,30	
		20.584,50
Amortissement 10 %		83.096,70
	Total Frs.	103.681,20
Recettes de la location, moyenne de Frs. 1,50 par compteur par mois = Frs. 18 par an . . .	env. Frs.	80.000 —
Frais de contrôle et de réparation seuls, sans les frais de pose, env. par compteur et par an	Frs.	4 —

Digitized by Google

Watt - voltamperometri elettrodinamici e a induzione.(*) (**)

Prof. Riccardo Arnò (Milano)

I nuovi metodi ed apparecchi di misura industriale, che ho ampiamente e dettagliatamente descritti nelle mie precedenti Comunicazioni fatte alla Associazione Elettrotecnica Italiana, e che si applicano tanto in impianti a corrente alternata semplice quanto in impianti trifasi, hanno per scopo di fornire la potenza apparente, ossia il prodotto della differenza di potenziale V per l'intensità della corrente I che alimenta l'impianto su cui si sperimenta.

Per effettuare tale misura, occorre anzitutto distinguere le due grandi categorie di impianti, e cioè:

Impianti per illuminazione, pei quali si considera il fattore di potenza variabile da 1 a 0,85, poichè in tali impianti si suppongono inseriti, oltre a lampade ad incandescenza, anche trasformatori riduttori per lampade a filamento metallico, ventilatori, piccoli motori, apparecchi medicali, apparecchi per riscaldamento, lampade ad arco, ed in generale apparecchi a carico induttivo per uso domestico.

(*) Questi metodi ed apparecchi di misura industriale sono brevettati nei principali Stati d'Europa e d'America.

(**) Vedi comunicazioni fatte alla Associazione Elettrotecnica Italiana: XIII Congresso in Brescia (29 settembre 1909); Sezione di Milano (3 dicembre 1909 e 19 aprile 1910); Sezione di Torino (28 maggio 1910). — " L'Elettricista „, vol. IX, n. 18, 1910.

Digitized by Google

Impianti per forza motrice, pei quali si considera il fattore di potenza variabile fra 0,9 e 0,5, come succede nell'ordinaria pratica delle applicazioni industriali della forza motrice.

Ora, incominciando a considerare il caso di impianti a corrente alternata semplice, io ho trovato che la misura della potenza apparente V . I si può effettuare con sufficiente pratica esattezza mediante un ordinario wattometro, sia esso elettrodinamico o a induzione, alla sola condizione che venga convenientemente modificato lo spostamento di fase ψ del flusso voltometrico rispetto alla differenza di potenziale fra le estremità del circuito voltometrico.

Nel caso dei wattometri, detto spostamento di fase è, come è ben noto, rispettivamente di 0° e di 90°, a seconda che si tratta di apparecchi elettrodinamici o a induzione. Orbene, nel caso, invece, dei misuratori della potenza apparente, i valori di ψ sono i seguenti specifici e caratteristici, rispettivamente per i due singoli casi di luce e forza:

luce ($\cos\varphi = 1 \div 0{,}85$)	apparecchi elettrodinamici	$\psi = 12°$
	„ a induzione	$\psi = 102°$
forza ($\cos\varphi = 0{,}9 \div 0{,}5$)	apparecchi elettrodinamici	$\psi = 42°$
	„ a induzione	$\psi = 132°$

Risulta per tal modo che con un unico apparecchio si potrà misurare la potenza apparente in impianti per luce e forza con fattore di potenza variabile fra 1 e 0,5. Per valori di

$$\cos\varphi = 1 \div 0{,}9$$

si userà l'apparecchio con la spirale voltometrica a spostamento di fase $\psi = \begin{cases} 12° \\ 102° \end{cases}$; e per valori di

$$\cos\varphi = 0{,}9 \div 0{,}5$$

si userà invece l'apparecchio con la spirale voltometrica a spostamento di fase $\psi = \begin{cases} 42° \\ 132° \end{cases}$. Un semplice commutatore permetterà di passare dall'uno all'altro caso.

Passando ora a considerare il caso di impianti forza trifasi dissimmetricamente carichi, io ho trovato ancora che la misura

Digitized by Google

della potenza apparente si può effettuare con sufficiente pratica esattezza mediante due ordinari wattometri, siano essi elettrodinamici o a induzione, alle sole condizioni:

1° Che gli spostamenti di fase ψ siano, tanto per l'uno quanto per l'altro dei due apparecchi, uguali a 12° se si tratta di apparecchi elettrodinamici, ed a 102° nel caso di apparecchi a induzione;

2° Che i due apparecchi, siano essi elettrodinamici o a induzione, vengano inseriti nello stesso modo nel sistema trifase, utilizzando per ciascuno di essi una differenza di potenziale concatenata in ritardo di fase di 30°.

È importante osservare che i due apparecchi elettrodinamici o a induzione usati per la misura della potenza apparente in impianti trifasi dissimmetrici, sono identici fra di loro (spostamenti di fase ψ uguali), e vengono inseriti in ugual modo l'uno rispetto all'altro nel sistema trifase che si considera. Dunque ne consegue che nel caso di impianti trifasi simmetrici, le indicazioni dei due apparecchi sono uguali, ciò che equivale a dire che l'indicazione complessiva dei due apparecchi è uguale al doppio dell' indicazione di uno qualunque dei due apparecchi stessi; per cui, in tal caso, la misura può venire effettuata con un solo apparecchio, e quindi notevolmente semplificata.

Gli apparecchi — costrutti ed inseriti secondo i principii e metodi esposti — si possono facilmente ottenere anche trasformando, mediante semplicissime operazioni costruttive e con la minima spesa, gli strumenti di misura oggi usati nella ordinaria pratica industriale.

Tali apparecchi (*voltamperometri*) potranno venire usati in pratica tanto come apparecchi misuratori da quadro, quanto come registratori, od ancora quali apparecchi integratori rispetto al tempo della potenza apparente (*voltcoulombometri*).

Coi nuovi metodi è quindi possibile applicare gli strumenti per la misura di V. I, anche in quei casi nei quali la misura dell'energia presso l'Utente, è fatta sulla base del prodotto dei voltampère per un coefficiente contrattuale prestabilito, corrispondente al fattore di potenza medio dell'impianto che si considera. E poichè il valore di tale coefficiente K oscilla nella pratica industriale fra i limiti 0,80 e 0,84 (valore medio 0,82); così si può dire che la misura dell'energia è fatta sulla base del prodotto V. I $\times$ 0,80 $\div$ V. I $\times$ 0,84 (medio V. I $\times$ 0,82).

Ne consegue infatti che, nella taratura degli apparecchi, la costante H degli apparecchi stessi può essere determinata in

Digitized by Google

modo da comprendere anche il coefficiente K, predeterminato in contratto: cosicchè — nel caso più importante a considerarsi, quale quello che più frequentemente si presenta nella ordinaria pratica industriale di $K = 0{,}82$ — avremo un nuovo valore della costante, che sarà dato da $H \times 0{,}82$. Ed ecco che in tal caso si possono usare gli apparecchi integratori della potenza apparente per misurare l'energia sulla base del coefficiente K di cui si è detto. E tale soluzione del problema, come è stato dimostrato, vale tanto per sistemi monofasi, quanto per sistemi trifasi.

Ora è noto come fra i vari inconvenienti del sistema di misura basato sul prodotto dei voltampère per un coefficiente contrattuale prestabilito, si debba annoverare quello assai grave di dovere necessariamente ritenere costante la tensione della rete di distribuzione. Ciò che non soltanto è inesatto, date le condizioni di funzionamento degli ordinari impianti a corrente alternativa per forza motrice, ma che potrebbe tornare a grave danno dell'Utente, il quale in corrispondenza delle stesse condizioni di lavoro dei suoi apparecchi utilizzatori, per un abbassamento della tensione oltre il valore normale, vedrebbe crescere notevolmente l'intensità della corrente nel suo impianto, e quindi la spesa inerente alla fornitura dell'energia per parte della Società nell'impianto stesso.

Ed è appunto a questo grave inconveniente che perfettamente sopperiscono i miei nuovi apparecchi di misura, sia che essi vengano usati sotto la forma di voltamperometri registratori, oppure di voltcoulombometri.

È infine notevolissimo da osservarsi che nel caso del sistema trifase, che è quello più importante nella pratica industriale, gli spostamenti di fase dati alle bobine voltometriche degli apparecchi stessi — se elettrodinamici — si riducono a valori relativamente piccoli ($\psi = 12°$), così da non essere praticamente influenzati dalle variazioni di frequenza che si possono riscontrare nella corrente di un dato impianto.

Del resto, allorquando, trattandosi di strumenti di precisione o di forti differenze di frequenza, si volesse ottenere una completa indipendenza dalla frequenza: allora, per ottenere i voluti specifici spostamenti di fase, si possono impiegare speciali disposizioni di resistenze ohmiche. Tali disposizioni vengono appunto realizzate dalla " C. G. S. „, Società per gli strumenti di misura elettrici, che costruisce i miei apparecchi; ed esse sono analoghe a quelle che io già aveva proposte alcuni anni or sono, per ottenere l'esattezza di fase negli ordinari contatori.

Digitized by Google

Ma anche nel caso del sistema monofase, per cui è grande il valore dello spostamento di fase $\psi = 42°$, e per cui conseguentemente ψ può essere notevolmente influenzato dalle variazioni di frequenza, occorre osservare che — trattandosi di misure industriali in impianti forza — si avranno nelle indicazioni del voltamperometro corrispondenti variazioni relativamente ancora piccole e praticamente trascurabili: in quanto che tali variazioni evidentemente dipendono, non già da quelle dei coseni degli angoli intorno a 42°, ma bensì dalle variazioni dei coseni degli angoli intorno a pochi gradi, per lo spostamento di fase φ nell'impianto di circa 42°; intorno a 12°, per φ uguale a circa 30°; ed intorno a 18°, per φ uguale a circa 60°.

Per quanto riguarda dunque l'influenza della variazione della frequenza, si può dire che i voltamperometri secondo il mio sistema, e del tipo elettrodinamico, si mantengono in condizioni non praticamente diverse dagli ordinari wattometri.

Ma è ora facile vedere che, prendendo a considerare il caso di apparecchi a induzione funzionanti in impianti forza, i voltamperometri si presentano — per quanto concerne il modo in cui essi vengono influenzati dalle variazioni della frequenza, della tensione e della forma della curva della corrente — in condizioni di funzionamento assai migliori dei wattometri. Immaginiamo, infatti, che, per una delle possibili cause di cui si è detto, lo spostamento di fase ψ venga modificato in uguali proporzioni tanto per gli uni quanto per gli altri apparecchi: per esempio, che esso subisca un aumento del 2 %. In altri termini, supponiamo che nel caso del wattometro (s'intende a induzione) l'angolo ψ sia portato da 90° a 92°, e nel caso del voltamperometro, l'angolo ψ venga modificato da 132° a 135°.

Le tabelle I e II indicano gli errori che rispettivamente si commettono — in corrispondenza dei differenti valori del fattore di potenza (da $\cos\varphi = 0{,}9$ a $\cos\varphi = 0{,}5$) — nell'uno e nell'altro di questi due casi. E queste tabelle pongono in chiaro che gli eventuali errori inerenti all'impiego di apparecchi a induzione, allorquando si producono delle possibili variazioni delle differenti caratteristiche di un impianto a corrente alternata, durante il suo funzionamento, sono assai più piccoli nel caso della misura della potenza apparente con l'applicazione dei miei nuovi apparecchi, che nel caso della misura della potenza reale. Ed è anzi notevolissimo il fatto che — mentre nel caso della misura dei watt, gli errori in questione possono anche assumere tali valori da autorizzarci a discutere se la misura stessa possa

Digitized by Google

TABELLA I

Watt.

$VI \sin(\varphi - \psi) = VI \cos\{\varphi - (\psi - 90°)\}$

φ	Da misurare $\psi = 90°$ $VI \cos \varphi$	Misura $\psi = 92$ $VI\cos(\varphi-2)$	Errore percentuale
26	0,899 VI	0,914 VI	$\frac{15 \times 100}{899} = +1,7$
30	0,866 VI	0,883 VI	$\frac{17 \times 100}{866} = +2$
40	0,766 VI	0,788 VI	$\frac{22 \times 100}{766} = +2,9$
50	0,643 VI	0,669 VI	$\frac{26 \times 100}{643} = +4$
60	0,500 VI	0,530 VI	$\frac{30 \times 100}{500} = +6$

TABELLA II

Voltampère.

$VI \sin(\varphi - \psi) = VI \cos\{\varphi - (\psi - 90°)\}$

φ	Da misurare $\psi = 132°$ $VI\cos(\varphi-42°)$	Misura $\psi = 135$ $VI\cos(\varphi-45°)$	Errore percentuale
26	0,961 VI	0,946 VI	$\frac{15 \times 100}{961} = -1,6$
30	0,978 VI	0,966 VI	$\frac{12 \times 100}{978} = -1,2$
40	0,999 VI	0,996 VI	$\frac{3 \times 100}{999} = -0,3$
50	0,990 VI	0,996 VI	$\frac{6 \times 100}{990} = +0,6$
60	0,951 VI	0,966 VI	$\frac{15 \times 100}{951} = +1,6$

ancora essere più o meno accettabile nella pratica ordinaria — nel caso, invece, della misura dei voltampère, i corrispondenti errori di cui si tratta sono al massimo dell'ordine di grandezza o di poco superiori agli stessi ordinari errori di lettura ammessi nelle misure industriali; e sono poi del resto, in ogni caso, praticamente nulli o affatto trascurabili per valori dello spostamento di fase φ nell'impianto, intermedi fra 30° e 60°.

Accoppiamento dei voltamperometri coi wattometri. Determinazione del fattore di potenza e del carico complesso. — È ovvio che, se noi faremo la misura contemporaneamente con un wattometro ordinario e con un voltamperometro, avremo subito il fattore di potenza dell'impianto su cui si sperimenta, dal rapporto delle indicazioni del primo a quelle del secondo, cioè:

$$\cos\varphi = \frac{V.I.\cos\varphi}{V.I}.$$

E così pure, potremo tosto ricavare il carico complesso C per la misura e tarifficazione dell'energia elettrica nell'impianto che si considera, dalla somma dei due terzi delle indicazioni del wattometro e del terzo delle indicazioni del voltamperometro:

$$C = \frac{2}{3} V.I.\cos\varphi + \frac{1}{3} V.I.$$

Digitized by Google

Watt-voltamperometri elettrodinamici e a induzione. Fasometri.

Similmente dalla combinazione di un voltamperometro e di un wattometro, in un unico apparecchio, se ne ricava uno strumento di misura atto a servire anche come *fasometro*, a fornire cioè — o indirettamente mediante due letture successive, o direttamente per mezzo di una semplice lettura —, oltre che la potenza apparente e la potenza reale, anche il fattore di potenza. Ed è chiaro come si possa allora (nel caso di apparecchi portatili di precisione) — una volta noto con sufficiente approssimazione il valore di $\cos\varphi$ — ricavare dalle relative tabelle di correzione, l'errore che si è fatto nella corrispondente misura di V. I, e dedurre in conseguenza i valori assolutamente esatti tanto della potenza apparente, quanto del fattore di potenza dell'impianto che si considera.

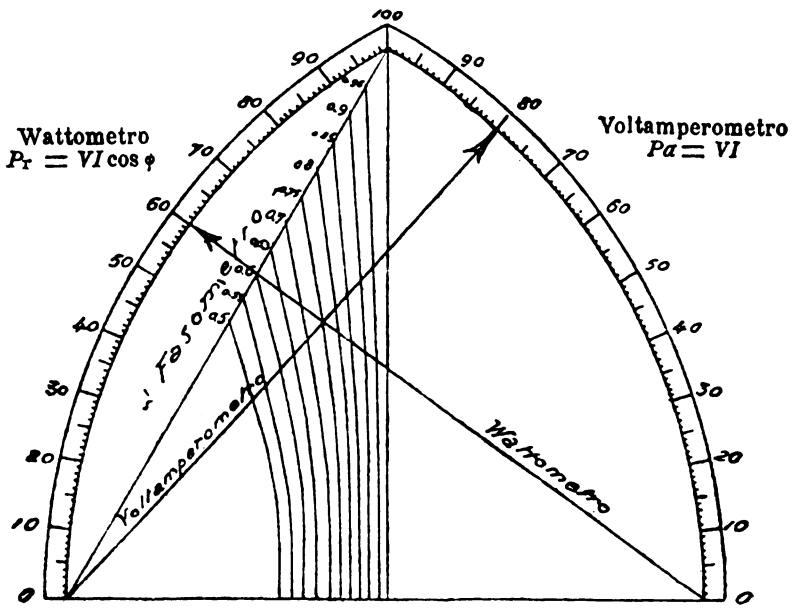
Nel primo caso l'apparecchio con due graduazioni sarà munito di un unico indice: e mediante un semplice commutatore si potrà passare dalla lettura fatta sull'apparecchio stesso, usato come wattometro, alla lettura fatta su di esso, usato come voltamperometro.

Nel secondo caso, invece, l'apparecchio con due graduazioni sarà munito di due indici; e la lettura diretta del fattore di potenza potrà essere fatta applicando i noti metodi, che permettono di fare la lettura del rapporto delle indicazioni fornite dai rispettivi indici di due dati strumenti di misura: come, a titolo di esempio, è rappresentato in figura, ove appunto il valore di $\cos\varphi$ è dato direttamente dalla lettura fatta mediante l'incrocio degli indici dei due strumenti, che, in tal caso, sono appunto un wattometro ed un voltamperometro.

È ancora facile vedere come, passando dagli apparecchi misuratori agli strumenti registratori, la commutazione che permette di leggere la potenza reale e la potenza apparente, successivamente sul medesimo apparecchio, invece di essere fatta a mano, come si è visto per gli strumenti indicatori, si possa invece fare nei registratori, a mezzo del medesimo movimento di orologieria che muove la carta, ricorrendo ad uno speciale commutatore rotativo automatico: cosicchè, sul diagramma di registrazione, si potrà vedere registrata ad intermittenze regolabili a volontà, oltre alla linea del carico wattometrico, anche

Digitized by Google

dei tratti più elevati, che ad intervalli regolari segneranno il carico voltamperometrico, e la cui ampiezza sarà regolata a seconda che lo richiede il caso, mediante il movimento di orologieria del registratore, che comanderà la commutazione periodica per le due letture. Non è il caso di insistere sulla importanza di avere un controllo quasi continuo dell'andamento del fattore di potenza con un mezzo così semplice e pratico.



Però occorre osservare che — trattandosi di apparecchi registratori — necessariamente la costante dell'apparecchio usato come wattometro deve coincidere con la costante dell'apparecchio impiegato come voltamperometro. Ora ciò che per strumenti elettrodinamici si presenta di facile soluzione, potrebbe invece sembrare difficile nel caso di apparecchi a induzione. Ed è appunto a tale riguardo che in questi ultimi tempi ho iniziato, con la collaborazione del mio assistente ingegnere Giulietti, una serie completa di ricerche sperimentali, le quali hanno posto in chiaro che il problema si presenta anche in questo caso facilmente risolvibile.

Cito, a titolo di esempio, il caso importante di applicazione del mio dispositivo voltamperometrico a wattometri a induzione nei quali lo spostamento di fase di 90° nel circuito voltometrico venga ottenuto col noto *metodo del ponte doppio*. Succede

Digitized by Google

allora che, essendovi due elementi atti alla regolazione, che sono la resistenza ohmica in derivazione e l'impedenza in serie, si ha la possibilità con pochi tentativi di arrivare alla soluzione della questione.

Ma v'ha di più: trattandosi poi di sistemi trifasi dissimmetricamente carichi, nel qual caso la costante del voltamperometro deve risultare inferiore a quella del wattometro, accade ancora che, col primo tentativo per il raggiungimento dello spostamento specifico di fase, ci si trovi già molto prossimi alla definitiva soluzione, il conseguimento della quale potrà quindi ottenersi con tutta facilità ed in brevissimo tempo.

RÉSUMÉ

Les nouvelles méthodes et les nouveaux appareils de mesure industriels ont pour but d'indiquer la puissance apparente, c'est-à-dire le produit de la différence de potentiel V *par l'intensité du courant* I *d'une installation à courant alternatif.*

Pour effectuer cette mesure, il convient de distinguer entre deux espèces d'installation:

Installations d'éclairage, *pour lesquelles le facteur de puissance varie entre 1 et 0,85.*

Installations pour force motrice, *pour lesquelles le facteur de puissance varie entre 0,90 et 0,50.*

Considérant d'abord les installations monophasées, l'Auteur a trouvé que la mesure de la puissance apparente VI *peut être faite avec une approximation pratiquement suffisante au moyen d'un wattmètre ordinaire, électrodynamique ou à induction, en ayant seulement soin de modifier l'angle* ψ *de phasage entre le flux et la différence de potentiel appliquée au circuit voltmétrique.*

En particulier dans les deux cas visés, les valeurs de ψ *sont les suivantes:*

Éclairage	*Appareils électrodynamiques*	$\psi = 12°$
„	„ *à induction*	$\psi = 102°$
Force	*Appareils électrodynamiques*	$\psi = 42°$
„	„ *à induction*	$\psi = 132°$

Digitized by Google

Dans les installations triphasées pour force motrice, chargées dissymétriquement, l'Auteur a encore trouvé que la mesure de la puissance apparente peut être effectuée avec une approximation suffisante en pratique, en employant deux wattmètres ordinaires, électrodynamiques ou à induction, sous les conditions suivantes:

1° Que le décalage des phases soit de 12°, pour les deux appareils, s'il s'agit d'appareils électrodynamiques, et de 102° s'il s'agit d'appareils à induction.

2° Que les deux appareils, électrodynamiques ou à induction, soient insérés de la même façon dans le système triphasé, en utilisant pour chacun d'eux une différence de potentiel en retard de 30°.

Les appareils, construits et insérés d'après les principes et les méthodes exposés, peuvent être réalisés facilement en transformant par des opérations très simples et avec une dépense minime, les instruments de mesure employés aujourd'hui dans la pratique industrielle.

Ces appareils (voltampèremètres) pourront être employés soit comme appareils de tableau, soit comme appareils enregistreurs, ou même comme appareils intégrateurs la puissance apparente par rapport au temps (volt-coulombmètres).

Il est évident qu'en employant en même temps un wattmètre ordinaire et un voltampèremètre, le rapport $\frac{VI\cos\psi}{VI} = \cos\psi$ *donne immédiatement le facteur de puissance.*

De la même façon, en combinant un voltampèremètre et un wattmètre on obtient un phasemètre, lequel peut donner, ou indirectement avec deux lectures, ou directement par une seule lecture, la puissance apparente, la puissance réelle et le facteur de puissance.

Il est aussi facile d'imaginer un appareil enregistreur dans lequel le mouvement d'horlogerie faisant sonner le tambour fasse fonctionner aussi un commutateur permettant à l'appareil d'enregistrer en même temps la puissance apparente et la puissance réelle.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. H. C. SHARP (New-York). *Il est vraiment intéressant que l'on puisse transformer tout simplement un wattmètre en un voltampèremètre. Ces instruments pourront trouver un champ important d'application. Le voltcoulombmètre aussi est très intéressant. Pourtant il ne faut pas trop nous en enthousiasmer, car le cas plus important où il faille connaître le facteur de puissance moyen est celui de grands consommateurs d'énergie triphasée, à tarif basé sur les voltampères aussi bien que sur les watts. En ce cas on peut obtenir le résultat souhaité, c'est-à-dire la mesure de l'énergie et du facteur de puissance moyen, en utilisant deux compteurs ordinaires, d'après la méthode bien connue.*

M. A. BARBAGELATA (Milan). *M. le prof. Arnò a noté qu'avec son système, en fournissant les deux wattmètres, l'on peut, sur des circuits triphasés, se passer des ampèremètres (trois si le circuit est inégalement chargé) et du voltmètre dans la mesure du facteur de puissance. Je me permets de rappeler que dans ce cas on peut se passer de tout instrument en employant seulement les deux wattmètres. En effet en modifiant avec un commutateur les connections des circuits voltmétriques, on peut obtenir des lectures complémentaires qui donnent le moyen de calculer l'exacte valeur du facteur de puissance, comme j'ai eu l'honneur de le démontrer jadis* (Elettricità, *1908, volume XXXI, n. 23*). *J'ajoute que la méthode, tout en exigeant des calcules un peu compliqués, est indépendante de la fréquence et rigoureusement exacte même avec des charges tout à fait dissymétriques, tandis qu'avec les deux voltampèremètres les résultats sont peu sûrs dès que les charges deviennent sensiblement inégales.*

M. R. ARNÒ (Milan) *reconnaît que l'on peut obtenir le facteur de puissance par d'autres moyens, mais il insiste sur les avantages d'un appareil, tel que le wattmètre même convenablement transformé, pour donner directement les voltampères, et au besoin soit la valeur instantanée du facteur de puissance, soit une valeur périodiquement enregistrée. De plus, si, dans le cas d'appareils intégrateurs, on le couple avec un compteur ordinaire il peut fournir la valeur moyenne du facteur de puissance pour une période déterminée, chose qui est d'une importance très grande dans les fournitures industrielles d'énergie électrique.*

Digitized by Google

Di alcuni nuovi strumenti elettrici da quadro

per corrente alternata.

G. MARTINEZ (Firenze).

Se non tutti, parecchi degli strumenti di cui avrò l'onore di parlarvi brevemente, sono stati recentissimamente messi sul mercato dalla Casa Weston; essi, salvo che per qualche notizia apparsa in periodici tecnici americani, possono dirsi completamente sconosciuti non soltanto in Italia, ma anche in Europa. Non sarà dunque inutile di prenderne in certo modo conoscenza insieme e voi mi perdonerete l'ardire che ho di volerveli illustrare, ardire che mi viene dalla opportunità che ho avuto di potere qui esaminare questi strumenti prima di ogni altra persona.

***

Trattasi di una completa serie di strumenti per quadri di distribuzione, destinati alla corrente alternata e qui ho un campione di *voltmetro* e di *amperometro*, un campione di *wattmetro* per circuiti monofasici ed uno per circuiti trifasici, un *frequenziometro*, un *indicatore del fattore di potenza* ed un *sincroscopio*, destinato al facile accoppiamento in parallelo degli alternatori.

Salvo che per questo sincroscopio, che mi sembra assolutamente nuovo nel concetto, e salvo anche il frequenziometro che, se pur somiglia ad altri apparecchi analoghi, è basato su idee nuove, gli altri apparecchi non sono basati su concetti e dispositivi veramente nuovi. Non era del resto basato su idee nuove il voltmetro Weston per corrente continua a bobina mobile, che

Digitized by Google

con la sua introduzione sul mercato, scendendo via via dal laboratorio scientifico al laboratorio industriale, all' officina, al montatore, ha imposto l' abbandono di tutti gli strumenti che 15 anni fa si vedevano ancora in giro, ed ha portato tutti i costruttori a *voler raggiungere*, a *dover raggiungere* ed a *raggiungere* una precisione di indicazioni che 15 anni fa sembrava semplicemente ideale. Nè era basato su principî nuovi il wattmetro portatile Weston che pure acquistò subito universale reputazione, di cui sempre gode e godrà per i suoi notevoli pregi in confronto degli altri tipi di wattmetri in uso.

Ma sul principio già noto, sulla disposizione più o meno perfettamente da altri realizzata, il dott. Weston studia e fa studiare, e fino a quando uno strumento non può essere costruito in modo che ogni dettaglio sia stato realizzato in seguito alle prove più esaurienti ed alla indagine scientifica più acuta, gli strumenti della fabbrica di Newark non vengono liberamente messi in commercio.

Così, per esempio, il passaggio dal wattmetro portatile al wattmetro da quadro — che è sempre lo stesso elettrodinamometro — ha richiesto una decina di anni di studi e di preparazione costruttiva. La maggior difficoltà è stata di eliminare tutti gli inconvenienti che in un simile strumento, con forze direttrici piccolissime, si potevano avere, sia per le correnti parassite nelle montature, sia per l'attrito sui perni dell'asse dell'equipaggio, asse che doveva esser reso orizzontale per conservare agli strumenti la solita forma rotonda. Sono stati tentati, ed in America anche venduti in piccol numero, wattmetri da quadro di forme speciali, con scale cilindriche, nei quali l'equipaggio era disposto con l'asse verticale; ma queste forme speciali di strumenti non sono indifferentemente accette a tutti, e soltanto ora, dopo l'introduzione degli strumenti di tipo rotondo, può dirsi che la Casa Weston abbia completato la serie degli strumenti da quadro per corrente alternata.

La Weston arriva dunque in questo campo in ritardo su altri costruttori, ma arriva con una serie di modelli così perfetti che lasciano indietro tutti gli altri e che per molti anni non potranno essere sorpassati. Come è avvenuto nei tipi a magnete permanente e bobina mobile, si avranno imitazioni anche dei nuovi strumenti, ma chi possiede degli strumenti Weston di 15 anni fa, sa che le migliori imitazioni odierne hanno raggiunto, non sorpassato l'originale che era già costruttivamente perfetto;

Digitized by Google

così sarà dei nuovi strumenti, che sono una maraviglia di costruzione elettromeccanica.

Giudicate voi stessi, o signori.

***

Cominciamo dal voltmetro e dall' ampermetro che non sono sostanzialmente differenti dagli strumenti portatili elettromagnetici della stessa Casa, strumenti già da qualche tempo conosciuti e di cui pure qui vedete degli esemplari.

Essi sono del tipo *a ferro dolce*, e se proprio non costituiscono un genere nuovo, sono stati così dettagliatamente e minuziosamente studiati che si sono eliminati, si può dire, tutti gli inconvenienti ritenuti inseparabili da quel tipo di strumento. Si ha ora con essi un tipo di strumento elettromagnetico, per precisione di risultati poco dissimile da quelli a bobina mobile per corrente continua, e, direi, superiore ai tipi portatili elettrodinamometrici della Casa stessa.

Nella bobina magnetizzante trovasi, come in altri strumenti ben noti, una linguetta di ferro dolce disposta in modo da respingere, quando magnetizzata, una palettina di ferro connessa all'equipaggio mobile. Quest'equipaggio leggerissimo è frenato da uno smorzatore ad aria, e l'indice di forma triangolare che ne assicura la solidità e indeformabilità, scorre sopra una bella scala che comincia ad un quinto della portata massima, e che da un terzo in su è sensibilmente uniforme. Con questo tipo di equipaggio vengono completamente soppresse le oscillazioni che hanno gli indici di certi strumenti quando varia il numero di periodi pel quale sono stati costruiti e così questi strumenti Weston si prestano bene da 15 a 120 periodi e non soltanto sono insensibili alla variazione di frequenza, ma sono praticamente insensibili alla forma della corrente, chè per nulla sono perturbati da fenomeni d'isteresi. L'apparecchio da quadro è racchiuso in una scatola di ferro stampato che offre una buona protezione dalle influenze magnetiche esterne. L' isolamento è curato in modo particolare e la rigidità dielettrica è provata a 5000 volt. Pertanto in pratica si possono impiegare con sicurezza gli ampermetri su circuiti a 2000 a 2500 volt: i voltmetri sono invece costruiti soltanto fino a 750 volt: al di là si uniscono a trasformatori.

Digitized by Google

Ho sott'occhio il risultato di un esame fatto nel laboratorio elettrotecnico nell'Università di Stoccolma su un ampermetro di 5 A e su un voltmetro di 150 V.

Riassumo i risultati:

Per entrambi gli strumenti aperiodicità quasi assoluta; massimo tempo per raggiungere la posizione di equilibrio 1 $^1/_2$'': nessuna traccia di vibrazioni dell'ago per frequenze tra 15 e 70.

Nell'ampermetro massimo errore riscontrato 0.2 di divisione nelle letture fatte collo strumento appena inserito; con strumento caldo errore 0.1 di divisione: errore medio della scala 0.08 di divisione nel primo caso, 0.05 di divisione nel secondo caso.

Nel voltmetro errore massimo 0.4 di divisione, errore medio 0.3 di divisione: nessuna differenza fra le lettere fatte con lo strumento a freddo o a caldo.

In entrambi gli strumenti nessuna differenza per cambiamento di forma della corrente e per cambiamento di frequenza. Per variazione di temperatura nell'ambiente, notata una correzione dell'uno per mille per ogni 10° negli ampermetri: nessuna nei voltmetri.

Caduta di tensione nell'ampermetro 0.28 volt; resistenza del voltmetro 2000 ohm.

Come si vede, ci troviamo di fronte a strumenti da quadro di vera precisione, possedenti delle qualità che difficilmente si riscontrano nei migliori strumenti portatili di precisione per corrente alternata oggi in uso.

I tipi portatili corrispondenti non offrono che la maggiore precisione derivante dalla lettura sull'indice lamellare. Prove esaurienti fatte in Europa all'Università di Dresda confermano che questi strumenti elettromagnetiei portatili Weston sono apparecchi che alla praticità dell'uso accoppiano doti di estrema precisione.

Così scarsa è l'influenza dell'isteresi del ferro in questi strumenti che praticamente essi potrebbero servire anche per corrente continua: in un ampermetro portatile da 5 ampère, controllato al Politecnico di Milano, alle indicazioni 2-3-4-5 ampère dello strumento, secondo le misurazioni fatte avrebbe corrisposto una corrente alternata di 1.99-3.01-4.01-5.01, ed una corrente continua di 2-3.02-4.04-5.03 amp. con errori inferiori al $^1/_2$ % per la corrente alternata, massimo dell'1 % per la corrente continua.

Digitized by Google

***

Passiamo ai wattmetri. Nei tipi monofasici vi è una bobina di campo ed una bobina mobile: nei tipi trifasici 2 bobine di campo e 2 bobine mobili componenti un unico equipaggio; l'aperiodicità è ottenuta col solito smorzatore ad aria.

Il wattmetro trifase può anche essere impiegato come wattmetro astatico per correnti continue. Questi strumenti soddisfanno ai seguenti requisiti:

1. La scala è assolutamente uniforme.
2. Lo strumento è pronto ed aperiodico e le letture si fanno con la stessa precisione sia che il carico varii rapidamente, sia che esso resti costante.
3. Le indicazioni sono uguali per corrente continua o alternata: quindi comodità di taratura e verifiche.
4. La scala è piana, disposta come negli strumenti ordinari da quadro.
5. L'equipaggio mobile non assume mai oscillazioni in dipendenza della frequenza.
6. Il consumo di energia è minimo.
7. Sopporta un sovraccarico fortissimo così che permette la misura di piena carica anche con fattore di potenza del 50 %.
8. È più solido di ogni altro tipo fino ad ora costruito.
9. È insensibile ai cambiamenti di temperatura, frequenza, forma di onde e fattore di potenza nei limiti di esattezza richiesti in pratica.
10. Lo zero si può rettificare dall'esterno.

È inutile discutere del pregio della scala uniforme piana, pregio comune ad altri wattmetri in uso, ma invece conviene accennare al grande vantaggio che deriva dalla leggerezza e dalla perfetta aperiodicità dell' equipaggio. Applicando ad un wattmetro Weston il pieno carico dalla posizione zero, l'indice oltrepassa l'indicazione massima di circa il 3 % della scala e si ferma alla posizione dovuta in 1 1 ½": in un wattmetro ad induzione invece applicando soltanto mezzo carico, l'indice balza al di là della dovuta indicazione fin del 65 %, e si ferma dopo oltre 6". Ma l'equipaggio Weston non pesa che grammi 1.84, e metà circa di questo peso è scaricata dalle spirali che portano la corrente, così che sui due perni grava complessivamente

Digitized by Google

meno di *un grammo*: invece negli elettrodinamometri ordinarsi hanno equipaggi che pesano molti grammi e negli apparecchi a induzione equipaggi di una quindicina di grammi. Ora la legi gerezza dell'equipaggio non soltanto conferisce allo strumento buone proprietà per fare esatte letture col carico rapidamente variabile, ma ne accresce enormemente la durata poichè non avvengono consumi nei perni stessi.

I circuiti che, come ho detto, possono sopportare forti sovracarichi, non scaldano sensibilmente durante il funzionamento: del resto occorrono circa 30° di variazione di temperatura per dar luogo ad un errore dell'1 %. Per avere un uguale errore in causa della variazione di frequenza bisognerebbe passare da 15 a 900 periodi.

L'avvolgimento *di tensione* possiede naturalmente una piccola induzione, ma essa è assolutamente trascurabile per i suoi effetti.

Nella spirale amperometrica (fissa) si disperdono a pieno carico 0,75 watt e 3,5 nel circuito voltometrico.

***

Negli apparecchi trifasici ciascuno dei circuiti mobili assorbe 2,5 watt.

Questi wattmetri trifasici risultano necessariamente molto alti e perciò sono costruiti in generale non come questo campione, ma in modo di rimanere per metà incassati nei quadri, quando devono essere accompagnati a strumenti che hanno minore sporgenza. Tutti questi strumenti sono a inserzione diretta per intensità fino a 100 A e per tensione fino a 750 V: al di là si usano trasformatori.

La costruzione dell'equipaggio dello strumento trifasico è, come facilmente si comprende, molto difficile: ciò non ostante l'equipaggio lungo e leggerissimo presenta una solidità ed una indeformabilità grandissima, e particolarmente è da notare la maniera con la quale sono fissati al perno le bobine mobili: col dispositivo adottato si assicura nella costruzione l'invariabilità di montaggio della bobina mobile rispetto alla bobina fissa.

***

Degli altri tre strumenti: l'indicatore del fattore di potenza è costruito come vari altri apparecchi del genere, nei quali si

Digitized by Google

ha una bobina, diciamo di intensità, generante il campo direttore fisso ed un equipaggio mobile con 2 bobine montate ad angolo retto fra loro, percorse da correnti, diciamo di tensione, diversamente sfasate.

Nei circuiti trifasi noi troviamo senz'altro queste correnti. Così nello strumento qui presente, disposto per circuiti trifasi, si inserisce in serie su una fase la bobina di campo e si attaccano ai tre conduttori i tre capi delle due bobine ad angolo retto, bobine che hanno un capo comune. Se invece lo strumento ha da servire per circuiti monofasi, deve essere nell'interno disposto con qualche differenza; inoltre devesi aggiungere un dispositivo per produrre uno sfasamento fra le due correnti che devono percorrere le bobine dell' equipaggio, epperciò una di queste viene collegata alla linea attraverso una resistenza ohmica, l'altra attraverso una resistenza induttiva. La prima delle bobine sarà così percorsa da corrente in fase con la f. e. m., la seconda da una corrente spostata rispetto a quella: il complesso delle due bobine darà un campo risultante pulsante in una direzione variabile a seconda dello sfasamento della f. e. m. rispetto alla corrente che percorre la bobina di campo. La posizione dell'equipaggio è quindi funzione dello sfasamento tra f. e. m. ed intensità: lo strumento è graduato in maniera da leggere direttamente il valore di cos φ da 0.50 ad 1 sia in avanzo che in ritardo. La scala è sensibilmente uniforme tra 0.50 e 0.95, mentre varia rapidamente in vicinanza dell'unità. Si possono avere anche strumenti con graduazione minore di 0.5. L'esattezza è dell' 1 °/₀.

Questi risultati sono dovuti sopratutto alla speciale costruzione del matassino con le due sezioni ad angolo retto: le due bobine sono avvolte simultaneamente intrecciandole assieme e risultano perfettamente uguali e in piani rigorosamente stabili e ortogonali, mentre in ogni altro strumento del genere le due bobine sono infilate l'una dentro l'altra e non si può garantire la loro perfetta perpendicolarità.

L'equipaggio non è soggetto a forze antagoniste, vi sono soltanto leggerissime spiraline destinate a condurre la corrente al sistema mobile. L' energia assorbita è al solito assai tenue, 2.5 watt nel campo; 6 watt nel circuito voltometrico.

È da notare che lo strumento deve essere adoperato per la frequenza per la quale è stato preparato, ed è naturale, perchè al variare della frequenza varia la distribuzione della corrente nei due matassini ortogonali e quindi la direzione della risultante.

Digitized by Google

***

Il frequenziometro Weston è basato su un elegante dispositivo. Due bobine fisse ad angolo retto fra loro sono percorse da correnti diversamente distribuite secondo la frequenza, e dànno luogo ad un campo pulsante, la cui direzione è esattamente determinata dalla frequenza stessa. Una lamina di ferro dolce speciale, connessa ad un equipaggio che comprende il solito indice e lo smorzatore ad aria comune agli altri strumenti, si orienta esattamente secondo la direzione del campo.

Alla prima bobina è connessa in serie una resistenza induttiva e sul gruppo è disposta in derivazione una resistenza ohmica: alla seconda bobina è connessa in serie una resistenza ohmica e sul gruppo è messa in derivazione una resistenza induttiva: i due gruppi sono collegati in serie fra loro e con una terza resistenza induttiva ed insieme sono derivati sulla linea. Variando la frequenza cresce la corrente in una delle bobine, e diminuisce nell'altra, e si ha così un'azione molto marcata ed una grande sensibilità dello strumento a minime variazioni di frequenza.

Le indicazioni sono praticamente indipendenti dalla f. e. m. e dalla forma della corrente. Si usano trasformatori ogniqualvolta la tensione di servizio è superiore a 150 volt. Lo strumento richiede circa 10 volt-ampère: naturalmente non si può parlare di watt, essendovi sfasamento notevole e variabile tra la corrente e la f. e. m.

***

L'ultimo e più interessante di questi strumenti è il *sincroscopio*, apparecchio che realizza un vero progresso su tutti gli altri sistemi finora usati per procedere all'accoppiamento di alternatori. Lo strumento è costruito come un wattmetro, ma i due circuiti fisso e mobile sono entrambi avvolti per tensione: il circuito fisso è derivato alle barre della macchina in azione con una conveniente resistenza ohmica in serie: esso possiede perciò una piccola induttanza. La bobina mobile è derivata sulla macchina che devesi accoppiare alla prima attraverso un condensatore.

Digitized by Google

Le costanti di due circuiti sono regolate in maniera che le due correnti risultano esattamente spostate di 90 gradi, se alimentate da f. e. m. in concordanza esatta o in opposizione di fase. Ne segue che, nei momenti di concordanza o di opposizione di fase, nessuna azione esercitandosi tra le due bobine l'indice si deve trovare allo zero cioè al centro dello strumento.

Se però le f. e. m. delle due macchine non sono in concordanza di fase, avremo un'azione elettrodinamica risultante, per la quale l'indice sarà spostato più o meno a seconda della differenza di fase, ed avrà la deviazione massima a destra o a sinistra per differenza di un quarto di periodo. Se le due macchine avessero rigorosamente la stessa frequenza, l'indice terrebbe una posizione fissa indicante la differenza di fase, ma data una piccola differenza nella frequenza, avremo necessariamente dei momenti di concordanza di fase, e poi successivamente una massima differenza, una opposizione, una massima differenza e di nuovo una concordanza. La durata di questo ciclo è tanto maggiore quanto più vicine sono le frequenze: l'oscillazione dell'indice sarà ugualmente tanto più lenta quanto più ci avviciniamo al sincronismo.

L'accoppiamento delle macchine (che saranno state portate naturalmente alla stessa tensione) si dovrà fare quando l'indice passa al centro, in corrispondenza però della concordanza di fase e non della opposizione. Per distinguere i due passaggi viene incorporato nello strumento il solito dispositivo della lampadina, che sta accesa nei dintorni della concordanza di fase; perciò si vede passare l'indice al centro soltanto quando vi è la concordanza di fasi, chè se la lampada è spenta non si vede nemmeno l'indice.

Supponiamo che la macchina da accoppiare vada un po' più lentamente della macchina in funzione. Noi vedremo passare l'indice al centro soltanto quando oscilla per esempio da destra a sinistra, durante il qual movimento la lampada lo illumina: abbiamo così l'illusione che l'indice stesso giri d'un movimento continuo. Se la macchina da aggiungere cammina invece più presto, noi vediamo illuminato l'indice durante l'oscillazione in senso contrario e abbiamo l'idea del movimento in senso contrario. L'apparente rotazione dell'indice ci dice se la macchina nuova deve essere accelerata o ritardata: quando, per la lentezza dell'oscillazione o dell'apparente rotazione, giudicasi raggiunta la stessa frequenza con abbastanza approssimazione,

Digitized by Google

si coglie il momento del passaggio dell'indice nella regione centrale per fare l'accoppiamento. Meglio di qualunque spiegazione servirà veder funzionare questo ingegnosissimo apparecchio, che facilita l'operazione portando in un unico indice l'osservazione che ora si è portati a fare su due dispositivi separati: un dispositivo di illuminazione e un apparecchio rotante non abbastanza sensibile per giudicare a colpo ciò che devesi fare.

Nella pratica il condensatore è di un unico tipo, e la regolazione della sua capacità è un mistero di officina. Il sincroscopio a 100 volt richiede 0.15 ampère: variazioni di voltaggio del 10 o 15 % o di frequenza fra 40 e 80 periodi non portano errori sensibili: tuttavia è utile di avere strumenti regolati per la frequenza e la tensione di servizio, nel qual caso non è difficile mettere le macchine in concordanza con l'approssimazione di un grado di fase. Aggiungo che il dispositivo, possedendo il vantaggio di non implicare alcun collegamento di circuiti fra le macchine, permette di mettere a terra i secondari dei trasformatori.

***

Sono certo che, se non le mie parole, l'esame da voi stessi fatto e che potrete completare a vostro agio ora di questi interessanti strumenti, non sarà stato a voi sgradito, e credo di non essere lontano dal vostro pensiero esprimendo un sentimento di riconoscenza al dott. Weston che tanto ha fatto per la precisione delle misure elettrotecniche industriali, con la creazione degli strumenti a bobina mobile — degli elettrodinamometri portatili — dell'elemento al cadmio, ed ora di questi strumenti che vi ho presentato.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Le Conférencier présente les instruments pour tableau de distribution récemment introduits par la Maison Weston.

Il décrit avant tout le voltmètre et l'ampèremètre, qui sont du genre électromagnétique à fer doux, et fait ressortir les particularités constructives qui font de ces appareils, eu égard à leurs prédécesseurs sur le marché, de vrais instruments de précision, comparables aux meilleurs instruments à courant continu.

Il donne à l'appui les résultats d'essais accomplis à l'Université de Stockholm, et profite de l'occasion pour présenter les instruments analogues portatifs, qu'il juge pratiquement supérieurs aux types électrodynamométriques; il cite aussi les résultats des essais faits sur un instrument de ce type à l'Institut polytechnique de Milan.

Il passe ensuite à la description des wattmètres pour courant monophasé et triphasé. Un modèle de la construction intérieure est montré pour donner une idée de la perfection de ces appareils, vrais chefs-d'œuvre de construction raisonnée. Enfin l'auteur décrit les trois instruments: indicateur du facteur de puissance, fréquenciomètre et synchroscope.

Il est montré des spécimens de tous ces instruments, dont les constantes de fonctionnement démontrent l'énorme progrès réalisé dans ces constructions sous le rapport de l'énergie absorbée et de l'exactitude obtenue.

Digitized by Google

I metodi di opposizione colle correnti alternate e la loro applicazione industriale.

Ingg. A. Barbagelata e L. Emanueli (Milano).

Introduzione.

Il metodo di opposizione o di compensazione immaginato dal Poggendorf e tutti gli apparecchi potenziometrici da esso derivati parvero per molti anni costituire una fortunata particolarità per le correnti continue e conferirono ad esse una indiscutibile superiorità rispetto alle correnti alternate nel campo delle misure di precisione.

E, a dir vero, non si saprebbe oggi vedere molto facilmente quali fra i numerosissimi e spesso ingegnosi metodi di misura con correnti continue immaginati per scopi speciali — eccezion fatta in alcuni casi pel ponte di Wheatstone e pei suoi derivati — non possano essere oggi felicemente sostituiti con un metodo potenziometrico.

Nel campo delle correnti alternate invece la necessità che le due differenze di potenziale da opporre abbiano non solo lo stesso valore e la stessa frequenza, ma anche la stessa fase e la stessa forma, e la mancanza di un galvanometro d'uso veramente pratico, sembravano due difficoltà quasi insormontabili.

Ma la tenacia dei tecnici e degli studiosi, nutrita dalla necessità sempre rinnovata di nuovi mezzi di ricerca e di esperienza, ha dato modo a poco a poco di superare tutte le difficoltà e oggi sono largamente in uso in molti laboratori dei veri potenziometri per correnti alternate i quali, se non risolvono forse ancora il problema per quanto riguarda la forma della curva,

Digitized by Google

dànno tuttavia splendidi risultati e costituiscono dei preziosi mezzi di ricerca, riportando per questo riguardo le correnti alternate allo stesso livello delle correnti continue.

Ufficialmente il primo potenziometro per corrente alternata ebbe la sua presentazione alla Physical Society di Londra nella riunione del 22 giugno 1909 per opera del Dr. Drysdale; ma, come risultò dalla discussione che seguì la comunicazione, gli apparecchi ed i procedimenti di cui esso si è servito erano già noti ed applicati in modi e per scopi analoghi. Il Drysdale stesso, d'altronde, fino dal 1906, occupandosi della misura delle piccole differenze di fase, aveva pubblicato alcuni speciali metodi di opposizione, ed a metodi di opposizione erano sempre ricorsi tutti coloro che si erano occupati delle determinazioni delle costanti dei trasformatori di misura (1).

D'altronde, e non per fare una questione di priorità che sarebbe fuori di luogo in simile argomento, dobbiamo qui ricordare che un metodo potenziometrico veramente completo fu da uno di noi applicato durante l'inverno 1906-1907 a certi suoi studi sullo *skin-effect* nelle lastre di rame. — Si opponeva (Vedi fig. 1) alla d. d. p. X da misurare una frazione RI della d. d. p.

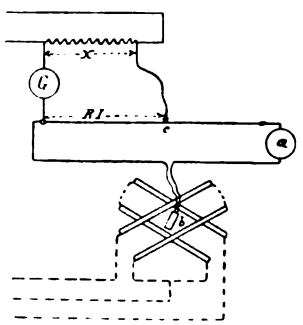


Fig. 1.

di un ponte a filo, alimentato da una bobinetta *b* girevole in un campo rotante ottenuto con due bobine fisse a 120° percorse da due correnti date da due fasi dello stesso alternatore trifase che alimentava tutto il circuito. — In tal modo ruotando la bo-

(1) Vedi bibliografia, numeri 1 ad 8.

Digitized by Google

binetta *b* si variava la fase e, spostando il contatto *c*, l'ampiezza della d. d. p. RI. — Come indicatore della raggiunta opposizione ossia della coincidenza in grandezza e fase della X colla RI, veniva usato un galvanometro a vibrazione G derivato da quello di Rubens.

Le varie disposizioni potenziometriche per corrente alternata oggi in uso si possono dividere in due gruppi. — In un primo gruppo sono comprese quelle basate sul concetto di variare la fase della corrente che percorre il circuito potenziometrico; nel secondo gruppo quelle invece che oppongono alla d. d. p. da misurare due frazioni note di due d. d. p. fra loro spostate esattamente di 90°. — In un certo senso si potrebbe dire che le prime sono a coordinate polari, le seconde a coordinate cartesiane.

Disposizioni potenziometriche del primo gruppo.

Le disposizioni potenziometriche di questo gruppo ripetono sostanzialmente lo schema già usato da uno di noi e riportato in fig. 1.

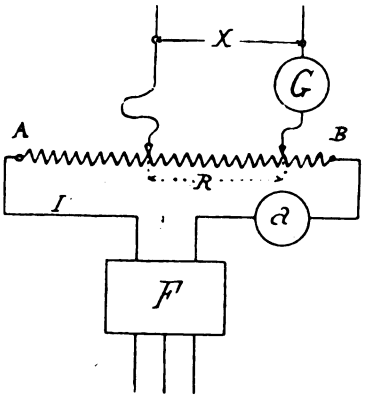


Fig. 2.

Esse infatti comprendono sempre (Vedi schema della fig. 2):

a) un circuito potenziometrico di resistenza fissa (AB) di cui mediante uno o più contatti mobili si può prendere una fra-

Digitized by Google

zione R qualunque, nota, disposto come negli ordinari potenziometri per corrente continua, ma costruito in modo da risultare completamente privo di reattanza;

b) un apparecchio *variatore di fase* F per variare e determinare la fase della tensione che alimenta il circuito potenziometrico;

c) un apparecchio *indicatore di zero* G che permette di giudicare quando l'opposizione è raggiunta, ossia quando la d. d. p. RI è uguale in valore e fase alla X.

Naturalmente l'apparecchio variatore di fase deve essere alimentato, direttamente od indirettamente, dal generatore stesso che alimenta il circuito a cui appartengono le differenze di potenziale da misurare.

Per la misura si procede in generale per successive approssimazioni regolando alternativamente la fase della corrente I ed il valore della R fino a ridurre a zero l'apparecchio indicatore.

Allora si ha senz'altro:

$$X = RI.$$

Se, come molto spesso accade, si devono semplicemente riferire l'una all'altra due o più differenze di potenziale di cui una sia nota od altrimenti misurabile, non occorre nessuna taratura, e si ha inoltre il vantaggio che le ordinarie variazioni di tensione del generatore non disturbano la misura, perchè fanno variare proporzionalmente tanto la differenza di potenziale incognita quanto la corrente I nel circuito del potenziometro. — È questo anzi uno dei pregi più caratteristici di questi metodi di opposizione: anche con tensioni notevolmente variabili, le misure si possono eseguire con una comodità ed una sicurezza che impressiona anche chi è abituato al maneggio dei potenziometri per corrente continua.

Ma se interessa determinare il valore assoluto della X, bisogna conoscere il valore della I che percorre il circuito del potenziometro. — Perciò in generale nel circuito stesso è inserito un milliampermetro di precisione *a* ordinariamente di tipo elettrodinamico il quale serve però solo come apparecchio di riferimento. — Si può infatti facilmente tararlo in posto nelle condizioni stesse in cui lavora alimentando il circuito del potenziometro con corrente continua e sostituendo alla X una pila campione ed a G un galvanometro per corrente continua.

Digitized by Google

In questi casi, naturalmente, l'approssimazione del metodo è legata a quella del milliampermetro; ma non è difficile, appunto perchè si procede per ugual deviazione, superare notevolmente l'approssimazione di $\frac{1}{1000}$, sopratutto ricorrendo ad apparecchi di costruzione speciale.

Le diverse disposizioni di questo tipo, proposte ed usate dai vari sperimentatori, non si differenziano pertanto che per gli apparecchi adoperati per variare la fase e per indicare lo zero; i quali tutti si possono brevemente così classificare:

I. — *Variatori di fase.*

1) *A resistenze:*

Sono usati da gran tempo sopratutto per le tarature e prove dei wattmetri e contatori e richiedono che si disponga di un sistema polifase. — Così se fra due fasi *ab* di un sistema trifase (fig. 3) si deriva una resistenza *r*, spostando lungo di essa il

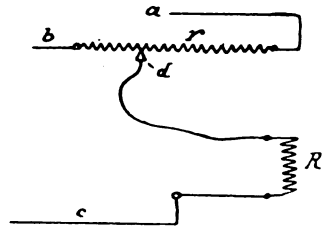


Fig. 3.

contatto mobile *d* si potrà far variare di 60° la fase della tensione che alimenta il circuito R, l'altro capo del quale è connesso alla terza fase C. Scambiando successivamente le fasi, si possono ottenere tutti gli altri possibili valori angolari della fase.

Analogamente si possono disporre tre resistenze *r* uguali (fig. 4) a triangolo sulle tre fasi di un sistema trifase: facendo ruotare i due contatti CC si può variare a piacere la fase della corrente che percorre il circuito R. — Le resistenze *r* possono essere anche induttive costituite da spirali avvolte sopra un toro magnetico.

Simili variatori, per quanto da taluni usati anche per dispo-

Digitized by Google

sizioni potenziometriche (1), non sembrano i più consigliabili, perchè con essi non si può, dalla posizione dei contatti, dedurre con sicurezza il valore della fase nel circuito alimentato se non

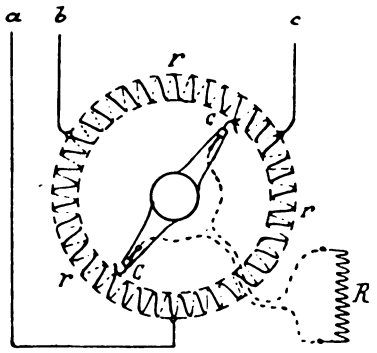


Fig. 4.

nel caso che la corrente da esso sottratta sia assolutamente trascurabile rispetto alle correnti assorbite dalle resistenze r.

2) *Ad induzione:*

Sono essi pure noti da tempo, derivando dagli ordinari motori polifasi ad induzione e sono anche largamente usati nell'industria ma sopratutto nella loro forma di regolatori di tensione. — Come è noto, constano di un ordinario motore ad induzione, il cui rotor avvolto può esser fatto ruotare a mano, mediante una trasmissione a vite perpetua, in modo da far variare la fase delle tensioni in esso indotte. Se l'avvolgimento dello stator è bipolare, un giro completo del rotor corrisponde ad una ruotazione di 360° della stella dei vettori rappresentativi delle tensioni indotte.

Si riteneva sulle prime che la presenza del ferro e la disposizione a fori o denti dell'avvolgimento potesse deformare la tensione indotta ed alterare l'esatta corrispondenza fra la sua fase e lo spostamento angolare del rotor. — Perciò si è ricorso da taluni a variatori ad induzione senza ferro, come quello appunto usato da uno di noi ed indicato in fig. 1. — Ma si è potuto constatare che i timori erano eccessivi.

(1) H. Sharp e W. Crawford, " Proceed. of. A. I. E. E. „, luglio 1910.

Digitized by Google

La presenza del ferro, mentre non dà luogo ai temuti inconvenienti, almeno in misura apprezzabile, rende il sistema insensibile ai campi esterni, temibilissimi con un apparecchio nell'aria, ed attenua gli effetti della reazione del secondario sul primario.

Nella fig. 23 si vede l'apparecchio usato nel Laboratorio dell'Istituzione Carlo Erba annessa al R. Istituto Tecnico Superiore di Milano. Esso è un ordinario motore trifase Gadda da 3 HP bipolare, con rapporto di trasformazione stator-rotor uguale ad uno. Lo si è completato montando sul suo asse un disco a fascia cilindrica diviso in gradi e in coseni. Il disco non è fisso ma può essere fissato sull'asse in una qualunque posizione mediante una vite di pressione. In tal modo, in ogni misura, dopo aver portato la tensione indotta in fase con quella determinata d. d. p. a cui si vogliono riferire tutte le altre, si fa ruotare la graduazione in modo da far coincidere il suo zero coll'indice fissato alla carcassa del variatore. Fermato il disco in tale posizione, si possono leggere direttamente in gradi o coseni i successivi spostamenti di fase misurati. Sulle graduazioni del disco il grado ha un'ampiezza di circa 2 m/m. Per la misura dei piccoli spostamenti si ricorre ad una seconda graduazione tracciata sul volantino di manovra. Su di essa un minuto corrisponde a 1,6 m/m.

Per potersi valere di questa seconda graduazione è stato necessario disporre una larga e robusta molla a spirale fra il rotor e lo stator, in modo da mantenere i denti della ruota dentata sempre in buon contatto contro il verme della vite perpetua: senza di ciò il gioco esistente nell'ingranaggio avrebbe portato un'incertezza di molti minuti nelle letture.

Con siffatto apparecchio si è potuto constatare, mediante un'accurata serie di esperienze, che lo scarto fra l'angolo letto direttamente sulla graduazione e quello dedotto dalle indicazioni contemporanee di un ottimo wattmetro e di un voltmetro e di un ampermetro (i quali ultimi però servivano solo pel controllo della costanza della tensione e della corrente, essendo sempre riportati alla stessa indicazione) si mantiene sempre entro limiti praticamente accettabilissimi e che rientrano nell'ordine di approssimazione della verifica stessa, come risulta dalla seguente tabella:

Digitized by Google

Angolo dedotto elettricamente	Angolo letto sullo sfasatore	Differenze in primi
20° 20′	20°	— 20′
60°	60°	0
90°	90°	0
103° 25′	103° 18′	— 7′
128° 40′	128° 48′	+ 8′
141° 25′	141° 45′	+ 20′
169° 40′	170°	+ 20′
180°	180°	0
219° 1′	218° 44′	— 17′
242° 20′	242° 1′	— 19′
261° 5′	261°	— 5′
288°	288°	0
308° 40′	308° 42′	+ 2′
339° 20′	339° 12′	— 8′
360°	360°	0

Per gli angoli molto piccoli letti sul volantino si è eseguito una seconda serie di esperienze disponendo il circuito come mostra lo schema della fig. 5 secondo il metodo indicato dal Drysdale per la misura delle piccole differenze di fase. Portato

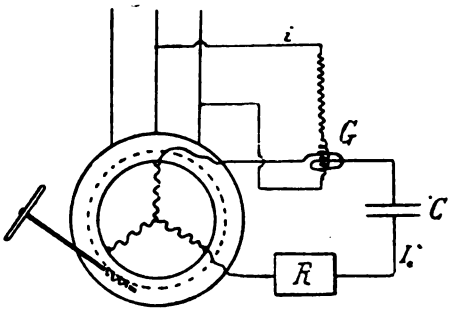


Fig. 5.

a zero l'elettrodinanometro G (i in quadratura con I_0) si dava una piccola variazione alla resistenza R in serie colla capacità C

Digitized by Google

provocando con ciò un piccolo spostamento $\Delta\alpha$ nella fase della I, espresso da

$$\Delta\alpha = \omega \Delta RC$$

$\left(\text{essendo R assai piccolo rispetto a } \frac{1}{\omega c}\right)$ e si misurava di quanto si doveva ruotare il volantino per riportarsi in quadratura.

Ecco alcuni dei risultati ottenuti:

Angolo dedotto dalle variazioni di R	Angolo letto sul volantino	Differenza
	(in minuti e decimi di minuto)	
8,45	9,5	+ 1,05
8,45	8,9	+ 0,45
8,45	8,25	— 0,2
16,8	12,7	+ 0,1
16,9	16,2	— 0,7
16,9	16,5	— 0,4
33,8	33,4	— 0,4
42,2	44,5	+ 2,3
67,5	67,3	— 0,2
67,6	66,—	— 1,6.

Anche in tal caso pertanto le differenze non eccedono i limiti che si possono in pratica ragionevolmente pretendere in tal genere di misura.

Riguardo al dubbio che, data la presenza del ferro, la tensione fornita dallo sfasatore sia deformata rispetto alla tensione che lo alimenta, già il Drysdale [1] aveva eseguito degli oscillogrammi diretti fin dal 1908. Noi abbiamo potuto determinare con molto maggior precisione la differenza tra la forma di curva primaria e di quella secondaria mediante la seguente esperienza.

Su una fase del primario di uno sfasatore trifase di costruzione Brown & Boveri veniva derivata una resistenza ohmica che veniva usata come potenziometro, per poter opporre una parte della tensione primaria alla tensione generata nell'avvol-

---

(1) " The Electrician „, 11, XII, 1908.

Digitized by Google

gimento secondario. Al posto del galvanometro era disposto uno dei due galvanometri di un oscillografo Blondel, l'altro essendo collegato attraverso ad una resistenza al circuito secondario dello sfasatore.

La differenza tra la tensione primaria e quella secondaria viene in tal modo determinata. Regolando opportunamente la fase della tensione secondaria e l'ampiezza della parte di tensione primaria che le viene opposta, si può arrivare a ridurre la differenza alle sole armoniche superiori.

Il risultato dell'esperienza è riassunto nell'oscillogramma della fig. 6 dove la curva di dimensioni maggiori rappresenta la tensione secondaria e la piccola, in iscala maggiore, la differenza

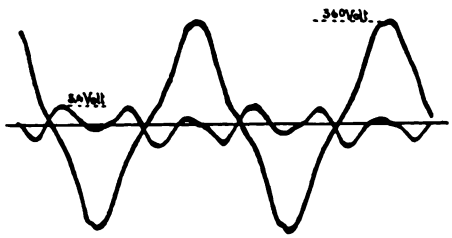


Fig. 6.

tra la primaria e la secondaria. — L'ordinata massima di quest'ultima è di poco superiore all'1 % dell'ordinata massima dell'altra; è quindi evidente che le differenze tra la forma di curva primaria e secondaria sono praticamente trascurabili.

II. — *Apparecchi indicatori di zero.*

Telefono:

Fin dalle prime misure con corrente variabile si è ricorso all'uso del telefono come apparecchio indicatore di zero; infatti è noto che con questo istrumento si possono rivelare correnti inferiori al microampère.

Questa sua sensibilità, la grande semplicità di costruzione e la nessuna delicatezza lo rendono un istrumento prezioso per le frequenze comprese fra i 500 ed i 5000 periodi. — In realtà per frequenze minori o maggiori dei limiti indicati, la sua sensibi-

Digitized by Google

lità è ridotta enormemente, non perchè diminuisca, a parità di corrente, l'ampiezza di oscillazione della lamina, ma perchè si riduce la sensibilità dell'orecchio dell'esperimentatore. Per le frequenze industriali minori di 100 periodi si può dire che il telefono è inservibile.

Ogni tipo di telefono ha una frequenza per la quale la sua sensibilità raggiunge un massimo, e ciò avviene quando il periodo di oscillazione proprio della lamina coincide con quello della corrente che percorre l'istrumento.

I telefoni costruiti dalla casa Siemens a scopo di misura presentano abbastanza netta questa condizione di risonanza intorno ai 1000 periodi. — In generale i telefoni comuni usati per la trasmissione hanno invece una lamina sottile sicchè lo smorzamento prevale rendendo poco evidenti gli effetti del periodo proprio della lamina stessa. — Della condizione di risonanza si può approfittare a scopo di aumentare la sensibilità dell'istrumento e sono anche stati costruiti dei telefoni nei quali il periodo proprio della lamina è ben netto e può venir variato.

Gli svantaggi principali nell'uso del telefono derivano principalmente dal nostro orecchio il quale talora in principio di una serie di misure non si abitua che lentamente ad afferrarne il suono, e di sovente si stanca. — La condizione stessa di zero è sempre un po' relativa, forse per la quantità di suoni che inevitabilmente ode l'orecchio contemporaneamente alla nota data dal telefono, sicchè di sovente accade che si crede che la nota sia scomparsa, mentre, perfezionando ancora la condizione di equilibrio, ci si accorge che il nuovo silenzio ottenuto è molto migliore del precedente; è bene perciò, quando si giudica che la nota sia spenta, alterare di poco le condizioni di equilibrio per risentirla, dopo di che il più delle volte si trova che il silenzio non era perfetto e che occorre perfezionare ancora la condizione di equilibrio.

Per tutte queste ragioni le migliori misure si eseguiscono quando si possa operare con una certa celerità disponendo di cassette di resistenza a manovella e meglio ancora di reostati a filo diviso.

Galvanometri a vibrazione:

Come è noto, il primo galvanometro a vibrazione fu il telefono ottico di Max Wien, il quale constava essenzialmente di un

Digitized by Google

telefono opportunamente modificato, sulla lamina del quale era incollato uno specchietto che rifletteva un'immagine luminosa sopra un'ordinaria scala per galvanometro.

Quando la lamina entrava in vibrazione, l'immagine luminosa si sfumava dapprima ai bordi e poi si allargava in una striscia la cui larghezza è una misura dell'intensità di corrente che mantiene la lamina in vibrazione. La fig. 7 rappresenta una modificazione del galvanometro a vibrazione del Rubens, studiata ed adoperata molto e con buon risultato da uno di noi.

La parte mobile portante lo specchietto è costituita da una serie di aghetti di ferro dolce sospesi mediante due bifilari nel campo magnetico di una calamita permanente. La corrente da misurare circola in quattro elettromagneti, avvolti in modo da dare, colle loro azioni sugli aghetti mobili polarizzati, una coppia che li faccia deviare dalla loro posizione di zero. Come nel galvanometro di Rubens, si può regolare la coppia dai due bifilari, sia variandone la tensione, sia variandone la lunghezza, in modo che il periodo di vibrazione meccanico del sistema degli aghetti coincida con quello della corrente che si vuole misurare. L'ampiezza delle oscillazioni per una data intensità di corrente nelle bobine ne viene allora enormemente aumentata. In questa condizione di risonanza si possono raggiungere delle sensibilità paragonabili a quelle dei galvanometri a corrente continua.

Coll'apparecchio rappresentato in fig. 7 con una resistenza interna di 70 ohm, una corrente di 1 microampère alla frequenza di 50 periodi, produce un allargamento della striscia luminosa di 40 m/m sulla scala ad 1 metro di distanza.

Un altro tipo di galvanometro a vibrazione studiato da parecchio tempo da uno di noi è rappresentato dalla fig. 8. — In questo istrumento la coppia direttrice agente sull'ago mobile è data non dal filo di sospensione, ma dal campo magnetico stesso che serve a polarizzarlo. L'ago munito di specchietto e costituito da una lastrina sottile di ferro è attaccato ad un filo di bozzolo teso sopra un telaino che viene collocato tra le bobine percorse dalla corrente da misurare. La calamita permanente polarizza l'ago e la coppia direttrice può essere variata sia mediante uno shunt magnetico costituito dalla vite di ferro V, sia mediante la variazione di riluttanza del circuito magnetico ottenuta regolando la distanza delle estremità delle due viti *v* tra le quali è sospeso l'ago. Questo tipo di istrumento è di una

Digitized by Google

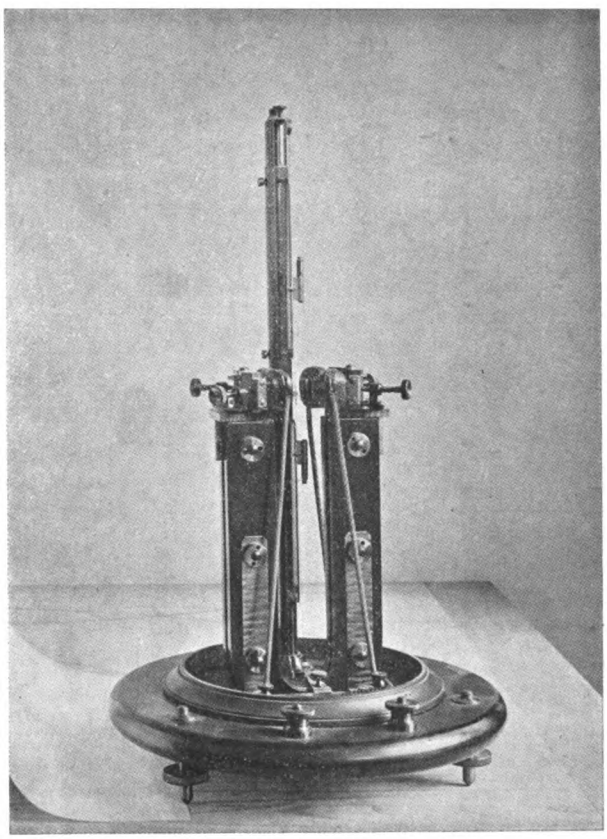


Fig. 7.

Digitized by Google

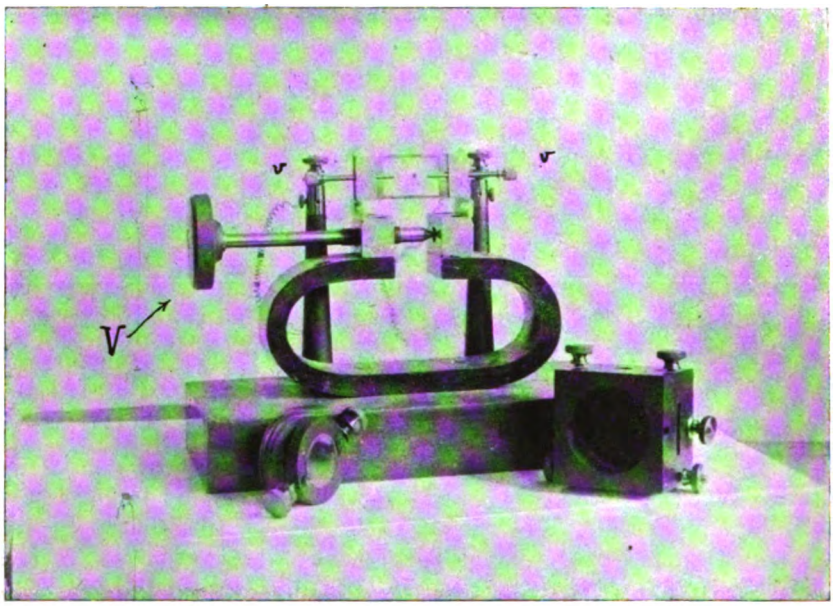


Fig. 8.

Digitized by Google

intonazione più semplice e più rapida dell'altro, può raggiungere una sensibilità maggiore ed ha il vantaggio che la sensibilità non decresce in ragione inversa della frequenza, come vedremo negli altri galvanometri a vibrazione.

Un inconveniente abbastanza grave, comune a tutti questi istrumenti, è la sensibilità rispetto ai campi magnetici generati dalla corrente circolante nei circuiti vicini. Si può, per ridurne gli effetti, ricorrere all'uso di uno schermo magnetico costituito da una camicia di ferro dello spessore da 5 a 10 m/m. Noi abbiamo trovato conveniente neutralizzare l'effetto del campo magnetico disturbante con un altro creato da una bobinetta ausiliare posta nelle vicinanze del galvanometro, o, come si vede nella fig. 18, meglio ancora, con due bobine disposte sullo stesso supporto e percorse da due correnti sfasate in modo da dare un campo ruotante. In tal modo variando la distanza delle due bobine dal galvanometro si varia l'intensità del campo compensatore e, facendole ruotare, se ne varia la fase.

Oltre a questi istrumenti ora descritti appartenenti al tipo ad ago mobile, da qualche anno sono stati introdotti e con successo anche dei galvanometri a vibrazione a quadro mobile derivati dal tipo D'Arsonval.

Il galvanometro di Campbell non differisce da un ordinario galvanometro D'Arsonval che per le dimensioni esigue della bobina mobile e per la sospensione che è bifilare e che può dare una coppia enormemente superiore a quella data dalle sospensioni degli istrumenti a corrente continua. Se il momento d'inerzia della bobina mobile è sufficientemente piccolo e la tensione di bifilare sufficientemente grande, la bobina entra in oscillazioni sincrone colla frequenza della corrente che la percorre, e se il periodo di oscillazione meccanico della bobina mobile è uguale a quello della corrente che vi circola, l'ampiezza di oscillazione diviene grandissima. Tale stato di risonanza può essere ottenuto tesando più o meno il bifilare o variandone la lunghezza mediante un ponticello.

Un galvanometro che si può far derivare dal precedente è il galvanometro descritto dal Duddel, il quale consiste in una bobinetta di una sola spira posta nel campo magnetico di una elettrocalamita. La disposizione adottata è simile a quella di un oscillografo, tranne che mentre in questo si cerca di raggiungere lo smorzamento critico della sospensione immergendola in un olio denso, nel galvanometro a vibrazione si cerca di ridurre

Digitized by Google

lo smorzamento al valore minimo possibile. La condizione di risonanza tra il periodo meccanico e quello della corrente nella bobina mobile è ottenuta variando la tensione dei due fili che la compongono. Duddel è arrivato in tal modo ad ottenere la risonanza per 1900 periodi al secondo, e con un tipo analogo in uso nel Reichanstalt si arrivò a 2500; noi crediamo che una frequenza così elevata sia raggiungibile solo con questo tipo di galvanometro, essendo estremamente ridotto il momento d'inerzia della parte oscillante e grande la coppia direttrice che si può ottenere. La superiorità del telefono è però tale a queste frequenze elevate da farlo sempre preferire al galvanometro, tranne che in casi specialissimi.

Un galvanometro che può rientrare nel tipo Duddel è quello descritto fin dal 1906 da Einthoven, in cui la parte mobile è ridotta ad un semplice filo percorso dalla corrente da misurare e teso nel traferro di una forte elettrocalamita. Il filo può essere di metallo, ma più generalmente, per ridurne al minimo valore possibile la massa, è costituito da una sottilissima fibra di quarzo argentata. Lo specchietto è soppresso e l'oscillazione della fibra è direttamente osservata con un microscopio munito di oculare micrometrico. Anche in questo tipo di istrumento si può, variando la tensione delle fibra, raggiungere la condizione di risonanza realizzando in tal modo una grande sensibilità.

Data la diffusione che hanno avuto in questi ultimi tempi i galvanometri a vibrazione, può essere interessante un cenno sulla teoria approssimata di questo tipo di istrumento per chiarire parecchi lati importanti del suo funzionamento.

Qualunque sia il tipo di galvanometro a vibrazione, chiamiamo M il momento d'inerzia della parte oscillante rispetto al suo asse di oscillazione; α l'angolo secondo cui nel tempo generico t è deviato dalla sua posizione di equilibrio; $C\alpha$ la coppia che la sollecita a ritornare a questa posizione; ci la coppia data dalla corrente circolante nell'istrumento.

Riteniamo inoltre lo smorzamento proporzionale alla velocità angolare della parte oscillante e la coppia che ne deriva sia:

$$A \frac{\partial \alpha}{\partial t}.$$

Possiamo allora scrivere l'equazione:

$$M \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} + A \frac{\partial \alpha}{\partial t} + C\alpha = ci \tag{1}$$

Digitized by Google

e ritenendo $i = i_{max} \operatorname{sen}(\omega t + \vartheta)$, l'integrale generale dell'equazione scritta è:

$$a = Pe^{-at} + Q \operatorname{sen}(\omega t + \varphi). \tag{2}$$

Il primo termine corrisponde al periodo durante il quale la parte mobile non ha ancora assunto lo stato finale del regime rappresentato dal secondo termine.

Apparentemente è nulla solo per $t = \infty$ ma praticamente si riduce presto ad un valore trascurabile.

I valori di a, di Q e di p si hanno formando le derivate prima e seconda di a dato da (2) e sostituendo i valori trovati in (1). Notando che la (1) così ottenuta deve essere identicamente soddisfatta per qualsiasi valore di t, si arriva alle equazioni:

$$\begin{cases} Ma^2 - Aa + C = o \\ (C - M\omega^2)\cos\varphi - A\omega \operatorname{sen}\varphi - \dfrac{ci_{max}}{Q}\cos\vartheta = o \\ (C - M\omega^2)\operatorname{sen}\varphi + A\omega\cos\varphi - \dfrac{ci_{max}}{Q}\operatorname{sen}\vartheta = o \end{cases} \tag{3}$$

dalle quali

$$a = \frac{A \pm \sqrt{A^2 - 4MC}}{2M} \tag{4}$$

$$Q = \frac{ci_{max}}{\sqrt{(C - M\omega^2)^2 + A^2\omega^2}} \tag{5}$$

$$\varphi = \vartheta - \gamma \tag{6}$$

dove

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{A\omega}{C - M\omega^2}$$

l'equazione (4) può avere forma reale od immaginaria; il primo caso ($A^2 > 4MC$) interessa gli oscillografi più che i galvanometri a vibrazione, nei quali ultimi si ha sempre $A^2 < 4MC$. In questo caso a assume la forma immaginaria:

$$a = \beta \pm j\lambda$$

e risolvendo l'espressione e^{-at} mediante le formule di Eulero e

Digitized by Google

sostituendo i valori di Q e φ si giunge ad assegnare ad α il valore:

$$(7)\ \alpha = e^{-\beta t}\left\{P_1 \cos \lambda t + P_2 \operatorname{sen} \lambda t\right\} + \frac{c\, i_{max}}{\sqrt{(C - M\omega^2)^2 + A^2\omega^2}} \operatorname{sen}(\omega t + \vartheta - \gamma).$$

Non interessa determinare i valori delle costanti P_1 e P_2 che dipendono dalle condizioni iniziali; notiamo solo che il termine in $e^{-\beta t}$ rappresenta l'oscillazione propria smorzata del sistema mobile che si sovrappone nel periodo di avviamento all'oscillazione forzata rappresentata dal secondo termine.

Perchè il galvanometro sia pronto occorre che β sia grande e poichè β è uguale ad $A/2M$ deve essere piccolo il momento di inerzia e grande lo smorzamento. Vedremo in seguito che è bene che lo smorzamento sia ridotto al valore minimo possibile, cosicchè si dovrà cercare di migliorare la qualità del galvanometro sotto questo punto di vista solo riducendo il momento di inerzia del sistema oscillante.

Riguardo al termine rappresentante l'oscillazione forzata notiamo subito che l'ampiezza dell'oscillazione sarà tanto maggiore quanto minore è il radicale:

$$\sqrt{(C - M\omega^2) + A^2\omega^2}$$

e cioè quando sia

$$C - M\omega^2 = 0$$

ed A piccolo. La prima condizione si riferisce all'intonazione dell'istrumento. Infatti l'oscillazione forzata ha un periodo τ uguale al quoziente di ω per 2π, ossia, supposta la condizione $M\omega^2 - C = 0$,

$$\tau = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C}{M}}.$$

Il periodo di oscillazione propria nel sistema oscillante è d'altronde uguale a

$$\tau_0 = \frac{1}{2\pi}\lambda = \frac{1}{2\pi}\frac{\sqrt{4MC - A^2}}{2M}$$

Digitized by Google

e qualora A fosse piccolo di fronte a $\sqrt{MC}$,

$$\tau_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C}{M}} = \tau.$$

La condizione $C - M\omega^2 = 0$ esprime dunque la condizione di risonanza del sistema.

L'oscillazione permanente prende allora la forma:

$$\alpha = \frac{Ci_{max}}{\omega A}\operatorname{sen}\left(\omega t + \vartheta - \frac{\pi}{2}\right).$$

Il valore massimo di α dipende unicamente dalla frequenza e dallo smorzamento e qui si vede bene quanto interessi ridurlo al valore minimo possibile.

Per poter studiare il galvanometro a vibrazione sotto tutti i punti di vibrazione è interessante di considerare anche la *forza elettromotrice indotta* nel circuito galvanometrico dell'oscillazione della parte mobile. È evidente intanto che il lavoro delle forze elettromagnetiche agenti sulla parte mobile dovrà essere eguale al lavoro della corrente che percorre il galvanometro, e cioè:

$$\int ci\,d\alpha = -\int E i\,dt,$$

ossia:

$$E = -c\frac{d\alpha}{dt},$$

e dall'equazione generale di α:

$$E = -c\frac{ci_{max}}{\sqrt{(C - M\omega^2) + A^2\omega^2}}\omega\cos(\omega t + \vartheta - \varphi).$$

In certi tipi di galvanometri a vibrazione, specialmente nel tipo studiato dal Campbell, il valore di E rappresenta fino il 98 % della forza elettromotrice applicata all'istrumento. In tali condizioni non si farà un errore notevole considerando E uguale alla forza elettromotrice applicata e si ricaverà allora che la sensibilità voltmetrica dell'istrumento definita come rapporto fra l'ampiezza delle oscillazioni della parte mobile al valore massimo di E, sarà

$$\frac{\alpha_{max}}{E_{max}} = \frac{1}{c\omega},$$

Digitized by Google

ossia in galvanometri a forte forza elettromotrice la condizione di risonanza non ha nessun effetto sulla sensibilità voltmetrica e non ha alcuna importanza lo smorzamento grande o piccolo che sia. Non c'è alcun vantaggio a disporre il galvanometro nelle condizioni di risonanza essendo la sensibilità indipendente dalla coppia e dal momento di inerzia della parte oscillante.

Interessa dunque di rendere piccola la forza controelettromotrice dell'istrumento e questa condizione si può raggiungere solo impicciolendo c e cioè il fattore della coppia dovuta alla corrente che si misura, condizione che conduce ad una diminuzione della sensibilità ampermetrica.

Nei galvanometri ad ago mobile, ad esempio, c può essere ridotto: 1° riducendo il numero di spire delle bobine; 2° diminuendo l'intensità del campo magnetico che polarizza l'ago; 3° diminuendo la lunghezza dell'ago.

La prima soluzione evidentemente conduce ad una diminuzione della sensibilità ampermetrica e così pure la seconda; non così si ha però per la terza soluzione, poichè riducendo la lunghezza dell'ago mobile si riduce lo smorzamento. Se si potesse ritenere che la maggior parte di A sia dovuta alla resistenza dell'aria nella quale l'aghetto si trova immerso, sarebbe anche A proporzionale al quadrato della lunghezza dell'ago ed allora essendo c proporzionale alla prima potenza di questa, la sensibilità ampermetrica nelle condizioni di risonanza

$$\frac{\alpha_{max}}{i_{max}} = \frac{c}{\omega A}$$

sarebbe in ragione inversa della lunghezza dell'ago, e sarebbe dunque conveniente di ridurla non solo per migliorare la sensibilità voltmetrica ma anche l'ampermetrica. In realtà la resistenza dell'aria rappresenta solo una parte molto piccola dello smorzamento, come risulta anche da alcune esperienze di Wenner; a noi sembra probabile che la gran parte dell'energia dissipata nelle oscillazioni dell'ago sia dovuta alla isteresi elastica del filo di sospensione il quale, data la notevole tensione che bisogna dargli per poter raggiungere la condizione di risonanza, deve avere anche una sezione abbastanza grande di fronte alle dimensioni della parte oscillante. Ha pure una notevole importanza la dissipazione di energia sui ponticelli che limitano la lunghezza

Digitized by Google

del filo di sospensione, tanto maggiore quanto meno esatta è la centratura della parte oscillante.

In conseguenza di tutto ciò è anche probabile che l'equazione differenziale dalla quale abbiamo preso le mosse non sia corretta e che la vera sia alquanto più complessa. Resta però fuori di dubbio che, riducendo le dimensioni della parte oscillante, si riducono le dissipazioni di energia che costituiscono la coppia di smorzamento e che con questo mezzo si raggiunge un aumento di sensibilità voltmetrica dell'istrumento, non solo senza svantaggio, ma bensì con un miglioramento della sensibilità ampermetrica. Ciò ci fu confermato dall'esperienza. È evidente che per il loro carattere generale queste osservazioni valgono anche per gli istrumenti a quadro mobile.

La sensibilità voltmetrica può essere aumentata anche mediante l'uso di un trasformatore, il primario del quale è connesso al circuito su cui si sperimenta ed il secondario al galvanometro; il rapporto di trasformazione può essere studiato caso per caso in modo da ritrarre dalla disposizione il massimo vantaggio. Tale sistema può presentare dei vantaggi quando si usino istrumenti a grande forza controelettromotrice, ma in generale non sembra conveniente per l'induttanza e per la dissipazione di energia nel trasformatore.

Elettrodinamometro:

Anche un elettrodinamometro può servire come indicatore di zero. Naturalmente esso non può essere adoperato come semplice galvanometro, con la bobina mobile collegata in serie colle bobine fisse, perchè la sua sensibilità, decrescendo col quadrato della corrente, risulterebbe in ogni caso troppo piccola in prossimità dello zero; ma eccitando il suo campo fisso con una corrente indipendente che sia in fase colle differenze di potenziale che si devono opporre, si può raggiungere facilmente una sensibilità paragonabile a quella di un galvanometro D'Arsonval, a parità, si intende, di tipo di sospensione dell'equipaggio mobile. Non è difficile mantenere la corrente nelle bobine fisse sempre in fase colla d. d. p. applicata al circuito potenziometrico: basta mettere le bobine fisse in serie col circuito stesso oppure — per conseguire una maggiore libertà d'azione nelle varie misure — alimentarle in serie con una sufficiente resistenza non induttiva r_o colla stessa d. d. p. V che alimenta il circuito potenziometrico (Vedi fig. 9).

Digitized by Google

Certo, a primo aspetto, può parere che un elettrodinamometro così adoperato, anche prescindendo dalla questione della sensibilità, debba cagionare dei notevoli errori a motivo dell'auto e della mutua induzione delle sue bobine — ma in realtà ciò non è, e con qualche cautela nell'uso esso può risultare, se non preferibile, certo non inferiore ai tipi di galvanometri precedentemente descritti.

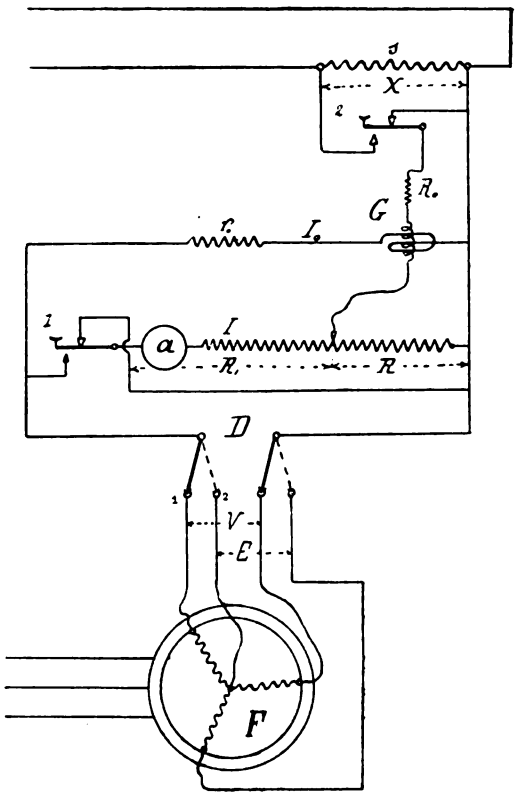


Fig. 9.

Per quanto riguarda la mutua induzione, o, in altri termini, l'effetto della corrente indotta nel circuito della bobina mobile dal flusso delle bobine fisse, è chiaro intanto che procedendo per riduzione a zero, basterebbe far coincidere la posizione di riposo della bobina mobile con quella per cui la mutua induzione si annulla. Una siffatta regolazione non è difficile ma sarebbe di assai scarsa utilità riuscendo quasi impossibile con sif-

Digitized by Google

fatti istrumenti a sospensione abbastanza delicata, mantenere a lungo la voluta coincidenza. — È pertanto preferibile procedere sempre per *falso zero*. — Basta perciò disporre le chiavi di manovra del circuito in modo che, nella loro posizione di riposo, chiudano la bobina mobile dell'elettrodinamometro su un circuito inerte pressochè nelle identiche condizioni di resistenza in cui si troverà durante il funzionamento. — La cosa risulta chiaramente dalla fig. 9.

A chiavi abbandonate la bobina mobile dell'elettrodinamometro si trova in serie colla resistenza addizionale R_o chiusa sopra l'arco doppio formato dalla R colla R_1 (comprendendo in R_1 anche la resistenza dell'amperometro *a*), ossia, detta *g* la resistenza propria della bobina, sopra una resistenza

$$g + Ro + \frac{R\,R_1}{R + R_1}.$$

A chiavi abbassate, vale a dire all'atto della misura, si avrà in più in serie colla R_o quella certa resistenza *s* che è compresa fra i punti di cui si misura la d. d. p. X, mentre alla R_1 si sommerà la impedenza Z del secondario del variatore di fase. — Ora è facile persuadersi che in pratica *s* e Z sono sempre trascurabili, specialmente agli scopi di una correzione, di fronte a $g + R_o$ e ad R_1 rispettivamente, pel fatto stesso che quando aumenta la d. d. p. X e con essa può aumentare la *s*, si devono, per necessità pratica, aumentare le resistenze R_o R, R_1. — Pertanto si può senz'altro ritenere che, a chiavi abbandonate, la bobina mobile si porterà in quella posizione per cui la coppia antagonista della sospensione fa equilibrio alla coppia motrice di mutua induzione, e basterà poi, abbassate le chiavi per la misura, riportare la bobina alla stessa posizione per eliminare qualsiasi errore. — Aggiungeremo subito che appena la bobina mobile abbia in serie una qualche resistenza ohmica, lo spostamento dello zero risulta assai piccolo e può in moltissimi casi essere anche trascurato.

Per quanto riguarda invece l'autoinduzione delle bobine è utile considerare il funzionamento dell'apparecchio in generale. Cominciamo a supporre nulla l'induttanza della bobina mobile per modo che la corrente *i* che la percorre sia sempre in fase colla d. d. p. che la genera e sia V (vedi fig. 10) la tensione agli estremi del circuito potenziometrico ed I_o la corrente nelle bo-

Digitized by Google

bine fisse dell'elettrodinamometro, spostata in ritardo di η rispetto a V a motivo dell'induttanza delle bobine stesse. — Supponiamo anche che la V non sia stata ridotta perfettamente in fase colla d. d. p. che si vuol misurare ma sia spostata rispetto ad essa di un certo angolo x. — Anche in tali condizioni di cose, la bobina mobile può essere ricondotta alla posizione di falso zero, quando la corrente i che la percorre sia in quadratura colla I_o, ossia quando $IR = OA$.

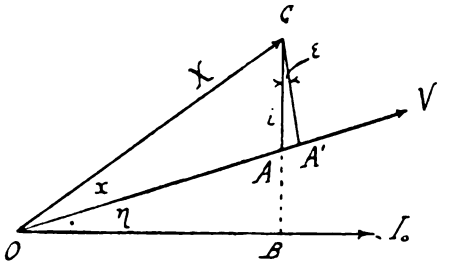


Fig. 10.

Ponendo pertanto $IR = X$ si giungerebbe ad un risultato erroneo; nel caso della figura minore del vero. Ora è facile vedere che

$$OA = \frac{OB}{\cos \eta} = \frac{X \cos (\eta + x)}{\cos \eta},$$

cosicchè l'errore assoluto commesso nella misura sarà:

$$dX = X \left(\frac{\cos (x + \eta)}{\cos \eta} - 1 \right)$$

e l'errore relativo

$$(1) \qquad \frac{dX}{X} = \frac{\cos (x + \eta)}{\cos \eta} - 1 = \cos x - \operatorname{sen} x \operatorname{tg} \eta - 1.$$

Ma la bobina mobile ha in realtà una certa induttanza cosicchè la i che la percorre ritarderà di un piccolo angolo ε rispetto alla d. d. p. che la genera. — Pertanto, sempre nelle condizioni supposte, ridotta la bobina mobile al falso zero (i in quadratura con I_o) la d. d. p. ai suoi morsetti sarà in fase con OA' e misureremo pertanto una $RI = OA' = OA + AA'$.

Trattandosi di un calcolo di errori, ed essendo gli angoli x, η ed ε sempre assai piccoli, si può porre

Digitized by Google

$$AA' \cong CA \operatorname{tg} \varepsilon \cong X \operatorname{sen} x \operatorname{tg} \varepsilon$$

e scrivere

$$OA' = X\left(\frac{\cos(x+\eta)}{\cos \eta} + \operatorname{sen} x \operatorname{tg} \varepsilon\right)$$

da cui

$$\frac{dX}{X} = \cos x + \operatorname{sen} x (\operatorname{tg} \varepsilon - \operatorname{tg} \eta) - 1;$$

e finalmente, sempre perchè ε ed η sono assai piccoli,

$$\frac{dX}{X} = \cos x + \operatorname{sen} x \operatorname{tg} (\varepsilon - \eta) - 1, \tag{2}$$

espressione generale dell'errore dovuto ad una imperfetta sinfasività di X con V ed all'induttanza delle bobine fisse e della bobina mobile.

È facile vedere intanto che la (2) coincide con la (1) per $\varepsilon = 0$. Ed essa ci dice che l'errore si annulla per $x = 0$, ossia, se la d. d. p. V che alimenta il circuito potenziometrico è perfettamente in fase colla X che si vuol misurare, l'elettrodinamometro dà risultati esatti *qualunque sia l'induttanza delle sue bobine.* — L'induttanza stessa non fa che ridurre la sensibilità del sistema nel rapporto $\frac{\cos(\eta - \varepsilon)}{1}$ ossia in misura assolutamente insensibile.

Ma da queste considerazioni sembra scaturire un'obbiezione grave per l'uso dell'elettrodinamometro. Dato che qualunque sia la relazione fra la fase di X e di V, è sempre possibile ridurre a zero la bobina mobile (potendosi sempre portare la i in quadratura colla I_o), come si potrà procedere nella misura? come si potrà controllare la coincidenza di fase tra V ed X? — Ora si vede subito che la grandezza misurata

$$OA' = X\{\cos x + \operatorname{sen} x \operatorname{tg} (\varepsilon - \eta)\}$$

se fosse $\varepsilon - \eta = 0$ avrebbe il suo massimo valore e coinciderebbe con X per $x = 0$. Vale a dire la sinfasicità di X con V si avrebbe in corrispondenza del massimo valore raggiunto dalla R e si dovrebbe pertanto spingere la misura per successive approssimazioni finchè il valore letto aumenta.

La manovra sarebbe inoltre agevolata da un'altra considerazione: raggiunta la sinfasicità, ogni variazione della fase di V

Digitized by Google

fa deviare l'elettrodinamometro in un certo senso, perchè fa prevalere la d. p. d. RI sulla X, mentre, finchè tra la X e la V esiste uno sfasamento, il senso della deviazione varia col senso della variazione data alla fase di V.

Se $\varepsilon - \eta$ è diverso da zero, è facile verificare che OA′ raggiunge un massimo maggiore di X per $\varepsilon - \eta = -x$ e precisamente un valore

$$OA'_{max} = X\,[\cos(\varepsilon - \eta) + \operatorname{sen}(\varepsilon - \eta)\operatorname{tg}(\varepsilon - \eta)]$$

a dire il vero molto prossimo ad X. — Per $\varepsilon = \eta = I^o$ l'errore sarebbe infatti di 1.55 decimillesimi.

Ma un siffatto modo di procedere per successive approssimazioni renderebbe la misura lunga ed anche mal sicura in ragione stessa della sua lentezza, e certo l'elettrodinamometro non potrebbe più preferirsi agli altri galvanometri descritti. — Fortunatamente è facile perfezionare il metodo eliminando ogni procedimento per approssimazione e rendendo la misura perfettamente paragonabile a quelle eseguite cogli ordinari potenziometri a corrente continua.

Disponendo di un variatore di fase ad induzione è sempre possibile ricavare dal suo secondario due f. e. m. fra loro in quadratura; per esempio, con un apparecchio trifase, prendendo la tensione E fra una fase ed il centro e la concatenata V fra le altre due fasi. Ciò posto, basta completare il circuito con un deviatore bipolare D (vedi fig. 9) e messolo in corrispondenza colla tensione E, abbassando solo la chiave 2, manovrare il variatore di fase fino a ridurre a zero l'elettrodinamometro. La d. d. p. E sarà allora in quadratura colla X; per conseguenza riportando il deviatore D sulla posizione 1 (in corrispondenza della tensione V) la tensione applicata al circuito potenziometrico sarà senz'altro in fase colla X e la misura si farà semplicemente regolando la R senza ulteriori preoccupazioni per la fase. — Il procedimento risulta facile, spedito, e la regolazione della quadratura di E con X si può fare con precisione, somma certo non inferiore al minuto. — Non è da credersi però che esso sia del tutto esente da errori. — Intanto nella prima fase, quando si regola la quadratura è necessario mettere una grande resistenza ohmica in serie colla bobina mobile per limitare la corrente che la percorre ed anche perchè la corrente da essa sottratta al circuito non sia tale da alterarne sensibilmente

Digitized by Google

le condizioni; perciò si può ritenere che in tali condizioni la corrente nella bobina sia perfettamente in fase colla X, cosicchè essa viene a trovarsi in quadratura perfetta colla I_o. Ma spostato il deviatore, la I_o sarà in fase perfetta colla X ma la V risulterà in avanzo di un angolo $x = -\eta$ rispetto alla X e si avrà quindi un errore relativo sostituendo nella (2)

$$\frac{dX}{X} = \cos\eta - \operatorname{sen}\eta \operatorname{tg}(\varepsilon - \eta) - 1.$$

Questo naturalmente supponendo che la E e la V siano rigorosamente in quadratura; se esse formano invece un angolo di $90 \pm \vartheta$ risulterebbe

$$x = \mp\vartheta - \eta$$

e quindi

$$\frac{dX}{X} = \cos(\vartheta \pm \eta) \mp \operatorname{sen}(\vartheta \pm \eta) \operatorname{tg}(\varepsilon - \eta) - 1.$$

I valori di ε e di η sono in generale assai piccoli e sarebbe d'altronde facile, volendo, ridurli a zero seguendo il concetto indicato dall'Abraham, di compensare la autoinduzione delle due bobine mettendo in serie con ciascuna di esse una capacità conveniente shuntata. — La regolazione non complica il metodo di misura; ma noi non la riteniamo necessaria dato che la parte preponderante dell'errore è in generale data dal I° termine e più specialmente da ϑ, ossia dalla imperfetta ortogonalità di E con V.

Ora, poichè un siffatto errore può anche non essere più trascurabile per misure di precisione (esso infatti supera l'1 %, quando $\vartheta + \eta$ tocchi i 2°30), è necessario poterlo apprezzare sperimentalmente e, quando ne sia il caso, annullare. — Cosa che, fortunatamente, è facile.

Si supponga, secondo il procedimento indicato (vedi fig. 11), di aver portato la corrente I_o nelle bobine fisse (alimentate dalla tensione di fase E) in quadratura perfetta colla X. — Allora manovrando il deviatore, le bobine fisse, alimentate dalla tensione V (che si suppone faccia colla E un angolo di $90° - \vartheta$ anzichè di 90°), saranno percorse dalla corrente I_o e, procedendo per opposizione, si verrà a determinare, come si è visto, il valore di OA. — Ciò fatto, se si torna ad alimentare il circuito fisso dell'elet-

Digitized by Google

trodinamometro colla tensione E, lasciando però sempre la tensione V applicata al circuito del potenziometro, poichè sulla bobina mobile agisce la d. d. p. AB, si avrà una deviazione proporzionale ad $\overline{AB} I'_o \cos(x + \eta)$. Manovrando il variatore ossia facendo ruotare insieme i vettori $I'_o E$ e V la deviazione diminuirà e si ridurrà a zero quando la tensione AB agente sulla bobina mobile dell'elettrodinamometro (la quale varia di ampiezza e di fase spostandosi il punto A sull'arco c. c.) verrà ad essere normale alla I_o (linee punteggiate della fig. 11; si suppone qui

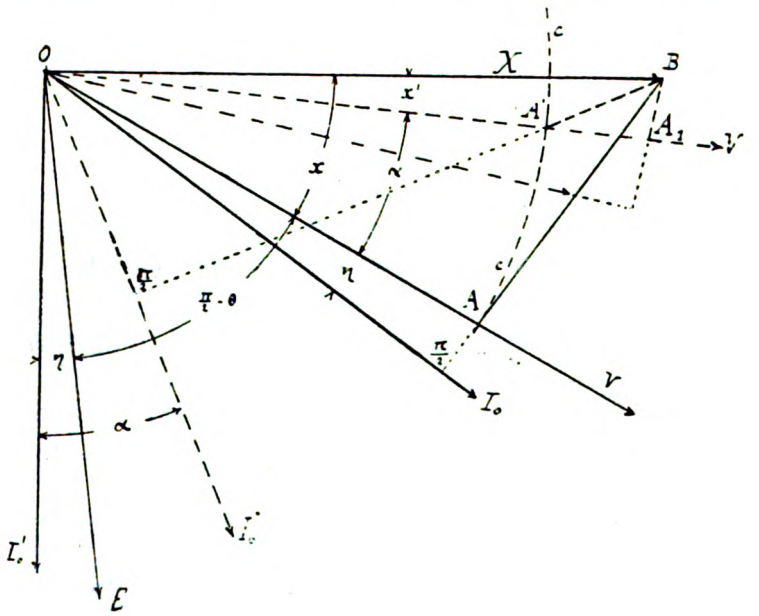


Fig. 11.

trascurabile per semplicità di ragionamento l'angolo ε). In tali condizioni la V non sarà ancora in fase colla X ma formerà con essa un angolo x' assai minore di prima. — E se pertanto si tornerà ad eccitare il campo dell'elettrodinametro colla V e si procederà ad una seconda opposizione, si avrà un nuovo valore OA_1 assai più prossimo ad X.

È dunque in sostanza ancora un metodo di successiva approssimazione ma va notato che ad esso si dovrà ricorrere solo eccezionalmente quando sia assodato che le due tensioni E e V non sono esattamente in quadratura o quando si esiga una precisione estrema. — Ma anche in questi casi è interessante far

Digitized by Google

notare che alla seconda approssimazione (vale a dire alla seconda opposizione) il risultato si può già ritenere assolutamente esatto. Si dimostra infatti facilmente che il valore dell'angolo x' che si ottiene col procedimento indicato è dato dalla relazione

$$x' = x - \alpha$$

dove α è dato da

$$\operatorname{sen} \alpha = \operatorname{sen} x \frac{\cos \vartheta}{\cos \eta}.$$

Trattandosi di angoli sempre piccoli (specialmente η) si può scrivere con approssimazione sufficiente

$$\alpha = x \cos \vartheta$$

ossia

$$x' = x (\cos \vartheta - 1).$$

Ne segue che, supposto anche un difetto di ortogonalità fra E e V di 10°, ciò che è enorme, ed $\eta = 2°$, con che lo sfasamento fra V ed X risulta $x = 8°$, dopo la manovra correttiva lo sfasamento fra la V e la X è ridotto a

$$x' \leqq 7'$$

ossia del tutto trascurabile.

Questo procedimento di correzione acquista speciale interesse dalla considerazione che qualche volta la corrente comunque piccola che si deve derivare agli estremi della X per portarsi in quadratura può alterare le condizioni generali del circuito e la fase vera della X. Con ciò, anche supposto le due tensioni E e V perfettamente ortogonali, si avrebbe un doppio errore sia nella fase che nell'ampiezza della X. Doppio errore che viene ad essere completamente eliminato procedendo come si è detto.

Possiamo adunque concludere che gli errori di auto e mutua induzione derivanti dall'uso dell'elettrodinamometro, o possono essere contenuti entro limiti accettabili, o possono facilmente essere corretti.

Di fronte ad essi si devono ad ogni modo tener presenti i pregi grandi dell'apparecchio. — Esso, infatti, a differenza degli altri galvanometri per corrente alternata, dà il segno della dif-

Digitized by Google

ferenza delle due d. d. p. che si oppongono, cosicchè elimina ogni incertezza nella condotta della misura ed ogni procedimento di successiva approssimazione per tentativi. — Il suo funzionamento è indipendente dalla frequenza, cosicchè non si richiede nessuna speciale regolazione. Per la stessa ragione esso può servire per la taratura con corrente continua della disposizione potenziometrica semplificando sensibilmente lo schema ed il procedimento del metodo. Finalmente permette di misurare direttamente qualsiasi componente di una d. d. p. e di una corrente e permette con ciò l'effettuazione rapida di molte speciali misure di cui parleremo più avanti.

Galvanometro Abraham:

Una sensibilità assai maggiore si può avere col galvanometro descritto da H. Abraham, consistente in un elettrodinamometro nel quale le bobine fisse abbracciano un nucleo di ferro e sono eccitate da una corrente ausiliare della stessa frequenza di quelle che si misura. L'istrumento assume l'aspetto di un ordinario galvanometro D'Arsonval, nel quale, al posto della calamita permanente, si ha un'elettrocalamita con nucleo laminato per evitare la formazione di correnti di Foucault. La fig. 12 rappresenta un istrumento di questo tipo. Abraham raggiunse con questo tipo di istrumento una sensibilità corrispondente a 400 millimetri di deviazione per microampère su una scala distante un metro dallo specchio dell'istrumento.

È da notarsi che con tale apparecchio l'angolo η è prossimo a 90°, cosicchè è conveniente ed in taluni casi necessario compensare l'autoinduzione della bobina fissa.

Raddrizzatori di corrente:

Sono stati proposti ed adoperati con successo dei raddrizzatori meccanici di corrente allo scopo di poter usare dei galvanometri per corrente continua. — L'artificio, consistente in un collettore fatto girare da un motore sincrono colla corrente da misurare, è noto e non richiede spiegazioni. — Solo è interessante notare che le spazzole devono poter essere fatte ruotare per ottenere che l'inversione della corrente avvenga nell'istante nel quale questa passa per zero, condizione che dà la massima deviazione del galvanometro; senza di che essendo questa proporzionale al valore medio della corrente che lo per-

Digitized by Google

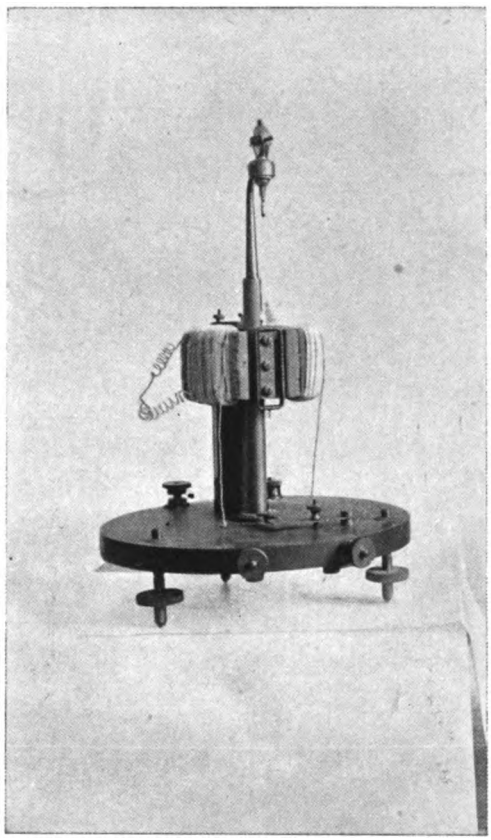


Fig. 12.

Digitized by Google

Digitized by Google

corre si determinerebbe in generale una sola componente che potrebbe anche avere un valore nullo quando l'inversione avvenga nell' istante in cui la corrente passa per il suo valore massimo. -- Il procedimento in conseguenza di ciò è per tentativi; ottenuto l'annullamento della deviazione del galvanometro si sposta l'arco delle spazzole fino a che si ha ancora un massimo della deviazione; regolando la disposizione potenziometrica si riduce nuovamente a zero il galvanometro e così per successive approssimazioni, finchè il galvanometro rimanga a zero per qualunque posizione dell'arco delle spazzole. — Va notato che praticamente la opposizione perfetta è raggiunta con due o tre tentativi. — L'operazione può essere resa più rapida alimentando il motore sincrono col secondario del variatore di fase e regolando una volta tanto le spazzole in modo che l'inversione avvenga in corrispondenza dell' annullamento della tensione.

Il fatto che il galvanometro sente in generale solo una componente della corrente che lo percorre rende paragonabile il suo uso a quello dell'elettrodinamometro e consente di applicarlo ai metodi speciali di cui si dirà più avanti.

Ricordiamo inoltre che il raddrizzatore può permettere di determinare direttamente la differenza di fase di due tensioni alternative, osservando l'angolo di cui è necessario ruotare le spazzole per ridurre a zero il galvanometro alimentato successivamente dalle due.

I signori Sharp e Crawford hanno studiato un tipo di raddrizzatore molto interessante, nel quale i contatti striscianti sono sostituiti da chiavi di inversione comandate da camme sincrone.

Sono stati anche proposti dei raddrizzatori elettrolitici costituiti da un sottilissimo filo di platino, del quale solo la punta è lasciata scoperta in un recipiente contenente una soluzione di bicromato potassico o di acido solforico. L'altro elettrodo è formato da una lastrina di platino. La cella così costituita viene polarizzata mediante la forza elettromotrice fornita da una piccola batteria e regolata mediante una disposizione di pila ridotta, e viene inserita nel circuito di misura in serie a un galvanometro per corrente continua. La disposizione è abbastanza sensibile ma i continui spostamenti di zero causati dalla irregolare polarizzazione della cella la rendono pochissimo consigliabile.

Digitized by Google

Sono pure stati proposti dei raddrizzatori basati sul principio della valvola di Fleming ma, per quanto ci consta, non furono adoperati a scopo di misura.

Disposizioni potenziometriche del 2° Gruppo.

Le disposizioni del 2° gruppo sono, come dicemmo, quelle in cui alla differenza di potenziale X da misurare si oppone la risultante di due d. d. p. a 90° fra di loro. In tal modo la X viene determinata per mezzo di due componenti ortogonali. Il risultato può essere ottenuto sia mediante una resistenza ed una induzione mutua sia mediante un sistema bifase:

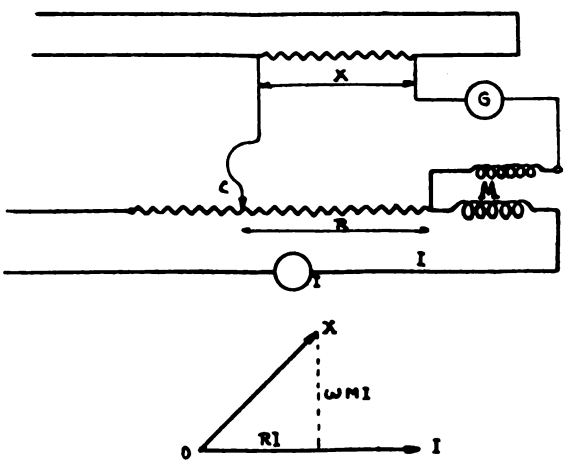


Fig. 13.

a) La fig. 13 dà lo schema del primo sistema: una resistenza fissa della quale si possa prendere una parte variabile R come in un ordinario potenziometro viene posta in serie, col primario di un campione di induzione mutua variabile M, il secondario del quale è congiunto ad un estremo della resistenza R. — La d. d. p. esistente tra il punto variabile sulla resistenza e l'altro estremo del secondario dell'induzione mutua è uguale, essendo i la corrente nel circuito, a

$$e = \mathrm{R}\, i + \mathrm{M} \frac{di}{dt},$$

Digitized by Google

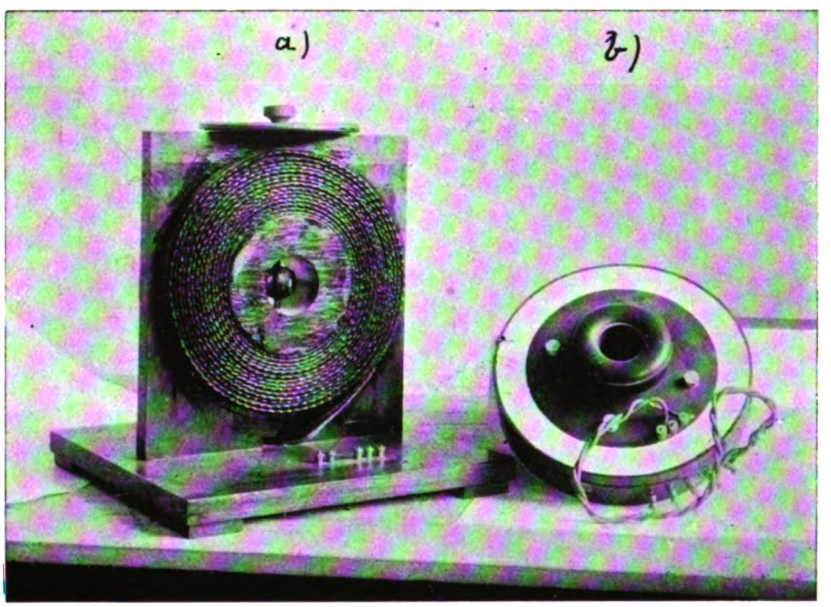


Fig. 14.

Digitized by Google

Digitized by Google

e se la corrente è alternata sinusoidale, le due componenti di e sono sfasate di 90° ed hanno rispettivamente per valore efficace RI e ωMI. — Solo in questo caso in cui la corrente è sinusoidale le due forze elettromotrici sono della stessa forma ed il metodo può essere adoperato.

La grandezza X è evidentemente data da

$$X = I\sqrt{R^2 + \omega^2 M^2}$$

e la fase riferita al valore corrispondente a $M = o$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega M}{R}.$$

Come nei metodi del 1° gruppo, la corrente I può essere misurata con un ampermetro di precisione e quando si tratti di misure di confronto nelle quali il circuito potenziometrico serve solo come termine di passaggio, interesserà solo la costanza di I e l'ampermetro potrà anche venire soppresso.

La resistenza R potrà essere costituita dalle resistenze di un ordinario potenziometro o più semplicemente da due cassette di resistenze in serie tra di loro, una delle quali costituisce la parte variabile R e l'altra non ha altro scopo che di mantenere inalterata la resistenza del circuito. — In misure correnti torna molto comodo anche un ponte a filo diviso, il cursore del quale prende sul filo teso la parte R variabile.

Il campione di induzione mutua può essere costituito da due bobine, una delle quali è fissa, l'altra ruotante intorno ad un asse nell'interno della prima. — Se la bobina ruotante è di dimensioni sufficientemente piccole di fronte al diametro interno della bobina fissa, si può ritenere che in tutta la zona che occupa, il campo magnetico generato dalla bobina fissa è uniforme ed il coefficiente di induzione mutua proporzionale al coseno dell'angolo tra gli assi delle due bobine. — Il campione rappresentato dalla fig. 14 *a)* è appunto di questo tipo. — Il vantaggio rispetto agli altri che descriveremo in seguito consiste unicamente nella taratura che richiede la sola misura del valore massimo del coefficiente di induzione mutua.

Per poter realizzare dei coefficienti di induzione mutua di valore sufficientemente elevato, senza dover impiegare una eccessiva lunghezza di conduttore e quindi portare a valori eccessivi

Digitized by Google

la resistenza dei circuiti, si è dovuto rinunciare alla bobina mobile di dimensioni piccole, occupando invece tutto lo spazio interno della bobina fissa.

La taratura in tal caso va eseguita per diverse posizioni della bobina mobile ed i valori intermedi si possono ottenere mediante l'interpolazione costruendo una curva.

In un tipo seguìto da parecchi costruttori, la bobina mobile si muove in un piano parallelo al piano della bobina fissa. — Questa disposizione permette di realizzare facilmente la cosiddetta astaticità del campione ossia di sottrarre la bobina indotta all'induzione degli altri flussi magnetici che non siano quelle generate dall'avvolgimento inducente, e elimina ogni azione inducente da parte del campione sui circuiti vicini. A tale scopo sono disposte due bobine inducenti nello stesso piano e collegate in modo che il flusso generato da ciascuna sia di senso contrario a quello generato dall'altra; con ciò si realizza la condizione che a breve distanza dall'apparecchio le azioni induttive siano nulle. Anche l'avvolgimento indotto è diviso in due bobine avvolte in senso contrario, realizzando in tal modo l'insensibilità per i campi magnetici esterni.

La fig. 14 *b)* rappresenta un campione di induzione mutua di questo tipo. Le due bobine inducenti sono portate dalla parte inferiore della scatola di ebanite che serve anche a proteggerle, le indotte sono portate dalla parte superiore, che può ruotare rispetto alla prima.

Le bobine indotte possono in tal modo scivolare sulle inducenti variando il coefficiente di induzione mutua. — L'avvolgimento è diviso in due parti per poter avere due scale di valori che sono da 0 a 15 millihenry e da 0 a 60 millihenry.

Per realizzare una forza elettromotrice variabile in grandezza e in fase mediante due componenti in quadratura, si può ricorrere ad un generatore bifase. — Una disposizione veramente originale è quella presentata dai signori Kennelly, Crane e Davis all'Università di Harvard (1), per quanto essa sia destinata a dimostrazioni didattiche più che non a misure di precisione. — Una lastra di zinco (vedi fig. 15) di circa 0,80 × 0,80 m. e di spessore uniforme di circa mezzo mm. è alimentata in due

(1) " Eletrical World „, 30 marzo 1911.

Digitized by Google

direzioni ortogonali attraverso una serie di resistenze uguali disposte in parallelo, da due correnti spostate fra di loro di un quarto di periodo, ottenute, per esempio, da un alternatore bifase.

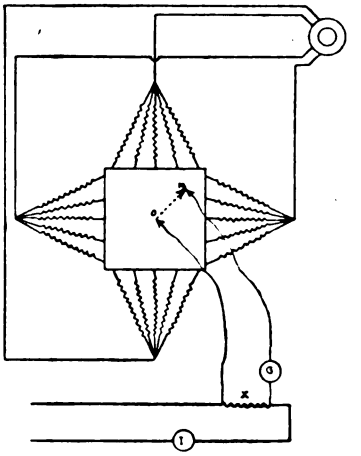


Fig. 15.

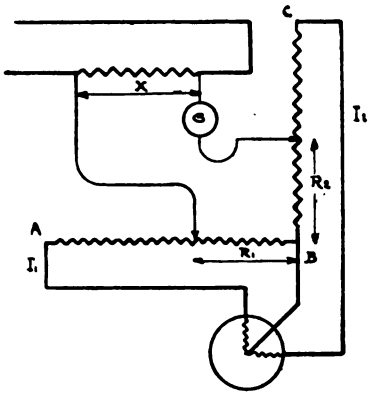


Fig. 16.

Il circuito di opposizione partendo dai punti fra cui esiste la d. d. p. X da misurare, fa capo da un lato al centro della lastra, dall'altro, attraverso ad un galvanometro a vibrazione G, ad un contatto che si può portare sopra un punto qualunque della lastra la quale costituisce il circuito fisso del potenziometro. — Ridotto a zero il galvanometro, il valore di X è dato direttamente in grandezza e fase (tenendo conto delle opportune costanti per la grandezza) dal segmento OM.

La lastra è quadrettata in centimetri per tutta la sua superficie, in modo che si leggono direttamente le coordinate del punto M.

Gli stessi sperimentatori hanno infine proposto di ricorrere a due veri circuiti potenziometrici AD, DC alimentati dalle due fasi di un sistema bifase, come mostra schematicamente la fig. 16. Ridotto a zero il galvanometro G si ha ovviamente:

$$X = \sqrt{I_1^2 R_1^2 + I_2^2 R_2^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_2 I_2}{R_1 I_1}.$$

Digitized by Google

Applicazioni.

Considerazioni generali.

Forma della curva.

Già si è detto che nessuno dei metodi proposti e sopra descritti risolve la difficoltà derivante da una eventuale differenza di forma delle varie grandezze alternative da misurare, almeno secondo il concetto consueto e più rigoroso del metodo di compensazione.

Per annullare ogni corrente dovuta a due d. d. p. agenti in opposizione si richiede infatti che i valori delle forze elettromotrici opposte siano uguali in qualunque istante ossia che siano identiche le loro curve rappresentative. Ora questa condizione di cose non è raggiungibile in generale che nel caso specialissimo che tanto il circuito potenziometrico quanto quello che si misura siano composti di sole resistenze non induttive (nel qual caso tutte le differenze di potenziale in giuoco conservano la stessa forma), oppure, quando si possa disporre di una corrente sinusoidale, essendo allora sufficiente che i circuiti non contengano elementi le cui caratteristiche siano funzione dell'intensità di corrente o della differenza di potenziale (circuiti contenenti ferro, resistenze elettrolitiche, ecc. ecc.).

Vediamo ora come si comportino i vari apparecchi indicatori di zero nel caso generale in cui la d. d. p. da misurare abbia forma diversa da quella che alimenta il potenziometro. Usando come indicatore di zero il galvanometro a vibrazione, quando esso sia ben intonato per l'armonica fondamentale della curva di tensione della quale si dispone, si può ottenere per questa una sensibilità che può arrivare ad essere più che 1000 volte maggiore di quella che si ha per le armoniche superiori. Si può dire allora che l'istrumento indicatore di zero non sente che l'armonica fondamentale per la quale l'equilibrio del circuito viene determinato senza che le armoniche superiori presenti siano tenute in conto. Sotto questo punto di vista è bene che il galvanometro a vibrazione abbia una risonanza ben netta, il che si può ottenere aumentando il momento d'inerzia della parte oscillante e riducendo al minimo il valore della forza contro-

Digitized by Google

elettromotrice dell'istrumento di fronte a quella applicata, anche se questo tornasse a scapito della sensibilità (inserendo, ad es., in serie all'istrumento una resistenza ohmica).

Se il rapporto tra la sensibilità per l'armonica fondamentale e quella per le armoniche superiori non è molto alto, la striscia luminosa data dallo specchietto sulla scala cambia d'aspetto, apparendo solcata da righe luminose in numero uguale alle addentellature che presenta la curva di corrente. Questa osservazione può tornare utile perchè, con un po' di abitudine, ci si rende conto facilmente della grandezza delle armoniche superiori.

Nelle misure col telefono la selezione dell'armonica fondamentale dalle superiori è fatta benissimo dall'orecchio che con un po' di abitudine riesce a distinguere l'annullamento dell'armonica fondamentale in mezzo al rumore prodotto dalle altre.

Stando così le cose, sia col galvanometro a vibrazione, come col telefono, i metodi di opposizione ci daranno sempre il valore e la fase dell'armonica fondamentale delle diverse d. d. p. misurate anzichè darci i valori relativi alle sinusoidi equivalenti che specialmente interessano in pratica.

Quando si usa come istrumento di zero l'elettrodinamometro il problema si presenta più complesso e merita di essere discusso un po' a lungo.

Sia X la tensione incognita rappresentabile con uno sviluppo di Fourier

$$X = \sum x_n \operatorname{sen} n\omega t + x'_n \cos n\omega t$$

e V la tensione del potenziometro rappresentabile pure come X da

$$V = \sum v_n \operatorname{sen} n\omega t + v'_n \cos n\omega t$$

chiamiamo con I la corrente nelle bobine fisse dell'elettrodinamometro e sia pure

$$I = \sum i_n \operatorname{sen} n\omega t + i'_n \cos n\omega t.$$

Perchè l'elettrodinamometro non devii bisogna, in generale, che il valor medio del prodotto della corrente nelle bobine fisse per quella nelle bobine mobili sia nullo.

Ritenendo piccolissima l'induttanza della bobina mobile la

Digitized by Google

condizione si riduce evidentemente a che sia nullo il valor medio del prodotto

$$I(V - X)$$

che a sua volta si riduce a:

$$\Sigma i_n (v_n - x_n) + i_n' (v_n' - x_n') = 0. \qquad [1]$$

Questa equazione può essere soddisfatta qualunque siano i valori dei coefficienti i_n, i_n', se $v_n = x_n$, $v_n' = x_n'$ ossia se le due curve di V e X sono identiche. Questa condizione è la vera condizione di opposizione, poichè annulla ogni corrente nella bobina mobile dell'elettrodinamometro. Una speciale condizione di equilibrio si può avere ancora per qualunque valore di i_n, i'_n se qualcuno di questi coefficienti si annulla, ossia se nella corrente I manca qualche armonica presente in V e in X. — In tal caso per l'equilibrio è necessario che nelle due curve siano identiche solo le armoniche presenti in I.

Un caso particolarmente importante è quello di I perfettamente sinusoidale. Allora l'equilibrio si ha quando siano uguali le armoniche fondamentali di V e di X; l'elettrodinamometro si comporta allora come il galvanometro a vibrazione.

Proseguendo nello studio dell'equazione [1] notiamo che questa può anche scriversi

$$\Sigma i_n v_n + i'_n v'_n = \Sigma i_n x_n + i_n' x_n'.$$

Ora se le bobine fisse dell'elettrodinamometro sono derivate su V e se la loro autoinduzione è trascurabile in modo che si possa ritenere che I abbia la stessa forma di V possiamo scrivere $I = kV$ e la condizione di equilibrio si riduce a

$$\Sigma v^2_n + v'^2_n = \Sigma v_n x_n + v_n' x_n'$$

se le bobine fisse sono invece collegate a X si ha analogamente, chiamando $\bar{V}$ il nuovo valore della tensione potenziometrica che dà l'equilibrio

$$\Sigma x^2_n + x'^2_n = \Sigma v_n x_n + \bar{v}_n' \bar{x}_n'$$

e se infine non si varia nelle due misure la fase della tensione potenziometrica sicchè si possa ritenere $\bar{V} = hV$ si ha

$$\Sigma x^2_n + x'^2_n = h \Sigma v_n x_n + v_n' x_n' = h \Sigma v^2_n + v'^2_n$$

Digitized by Google

ed osservando il significato del primo e dell'ultimo termine si può scrivere

$$X_{eff} = \sqrt{h}\, V_{eff}$$

e sostituendo ad h il suo valore $\frac{\overline{V}}{V}$

$$X_{eff} = \sqrt{\overline{V}_{eff}\, V_{eff}}.$$

Si può dunque ottenere il valore efficace di X colla media geometrica delle due letture.

Il metodo si spiega da sè: fatta una prima determinazione del valore V che annulla la deviazione dell'elettrodinamometro quando le bobine fisse sono alimentate dalla tensione stessa del potenziometro, si alimenteranno colla differenza di potenziale X e si fa una nuova determinazione della tensione potenziometrica $\overline{V}$ che annulla la deviazione. La media geometrica dei due valori dà direttamente il valore efficace di X *qualunque sia la forma della curva di* V *e di* X.

I due valori V e $\overline{V}$ non possono in generale essere uguali: si ha infatti delle equazioni scritte

$$\sqrt{(\Sigma x^2_n + x'^2_n)(\Sigma v^2_n + v'^2_n)}\, \frac{1}{\sqrt{h}} = \Sigma v_n x_n + v'_n x'_n.$$

Ora a parte un coefficiente uguale nei due termini questa equazione può scriversi

$$X_{eff}\, V_{eff} \frac{1}{\sqrt{h}} = \text{Prodotto medio di V con X}$$

dalla quale risulta chiaro che h dovrà avere un valore maggiore di uno, tranne nel caso che V e X siano identiche non solo in fase, ma anche in forma. Occorre dunque sempre fare due letture ed è evidente che la massima precisione si avrà quando si possa ridurre h al valore minimo. Questo valore minimo di h dà anche un'idea della differenza tra la forma di V e di X.

Possiamo dunque considerare il problema risolto almeno in linea generale per quanto riguarda il valore efficace. Rimane la questione della fase. Il problema in linea generale si può dire insolubile per la ragione che non si sa come definire la

Digitized by Google

fase di un'onda deformata se non rispetto ad un'onda della identica forma. Usando il concetto di sinusoide equivalente si viene a sostituire all'onda deformata un'onda sinusoidale che ha lo stesso valore efficace e che dà lo stesso prodotto medio con un'altra onda presa come punto di partenza. Va notato che questa sinusoide equivalente non ha alcun senso se non è definita in grandezza ed in fase l'altr'onda che si assume per formare il prodotto medio e che non può essere adoperata per qualsiasi operazione con altre onde. Il problema di determinare n grandezze alternative in grandezza e in fase non si può dire risolto in linea generale se non determinando i coefficienti delle singole armoniche componenti.

Per determinare sperimentalmente un'onda deformata secondo il concetto di sinusoide equivalente il potenziometro, si presta assai bene, essendo facile determinare con esso il valor medio del prodotto di due grandezze.

Supponiamo infatti di avere oltre la grandezza X la grandezza Y definita

$$Y = \Sigma y_n \operatorname{sen} n\omega t + y'_n \cos n\omega t$$

e per distinguerle indichiamo con V_x le tensioni potenziometriche opposte a X e V_y quelle opposte a Y. Si hanno per la determinazione dei valori efficaci le equazioni identiche a quella scritta sopra:

$$\Sigma v^2_{xn} + v'^2_{xn} = \Sigma v_{xn} x_n + v'_{xn} x'_n$$

$$\Sigma x^2_n + x'^2_n = \Sigma \bar{v}_{xn} x_n + \bar{v}'_{xn} x'_n$$

e analogamente

$$\Sigma v^2_{yn} + v'^2_{yn} = \Sigma v_{yn} y_n + v'_{yn} y'_n$$

$$\Sigma y^2_n + y'^2_n = \Sigma \bar{v}_{yn} y_n + \bar{v}'_{yn} y'_n.$$

Se si fa ora una misura di Y alimentando le bobine fisse dell'elettrodinamometro colla tensione X, si ha una quinta equazione che come facilmente si può dimostrare è (detta E la tensione del potenziometro, che dà l'equilibrio)

$$\Sigma x_n e_n + x'_n e'_n = \Sigma x_n y_n + x'_n y'_n.$$

Digitized by Google

Se la misura viene eseguita mantenendo la tensione potenziometrica sulla stessa fase di V_x e di $\bar{V}_x$ si ha essendo $E = m\bar{V}_x$

$$m \Sigma x_n \bar{v}_{xn} + x'_n \bar{v}'_{xn} = \Sigma x_n y_n + x'_n y'_n$$

ossia

$$m X^2_{eff} = \text{Prodotto medio di X con Y}$$

ossia

$$X^2_{eff} \frac{E_{eff}}{\bar{V}_{xeff}} = \bar{V}_{xeff} V_{xeff} \frac{E_{eff}}{\bar{V}_{xeff}} = V_{xeff} E_{eff} =$$

$$= \text{Prodotto medio di X con Y.}$$

Si ha in tal modo il mezzo di conoscere le sinusoidi equivalenti di X e Y riferite l'una all'altra.

Un caso particolarmente importante per la pratica si ha quando X abbia la stessa forma di V. Allora le due equazioni [1] e [2] si possono evidentemente far coincidere, e le misure necessarie alla soluzione del problema si riducono a quattro.

Le conclusioni che si possono trarre da tutto quanto siamo venuti esponendo si possono pertanto così riassumere:

1. Non si può parlare di vero metodo di opposizione se non nel caso in cui le d. d. p. che si oppongono abbiano *la identica forma*. Se esse sono anche sinusoidali il metodo potenziometrico risulta rigorosamente esatto sotto tutti i riguardi; in caso diverso esso ci dà ancora i valori efficaci delle varie d. d. p., ma le relazioni di fase che si misurano non hanno alcun senso per quanto riguarda il prodotto di due grandezze. Non è possibile in altre parole dedurre, per esempio, un apotenza dallo spostamento di fase così misurato fra tensione e corrente.

2. Col telefono, col galvanometro a vibrazione e coll'elettrodinamometro (purchè le sue bobine fisse siano eccitate con corrente sinusoidale) si misurano in grandezza e fase solo le armoniche fondamentali delle diverse d. d. p. Il metodo, che non si può più considerare come rigorosamente di opposizione, perchè l'organo galvanometrico è percorso da corrente dovuta alle armoniche superiori, è da ritenersi sempre praticamente esatto, ma la sua approssimazione effettiva va studiata caso per caso.

La determinazione dell'armonica fondamentale è sufficiente quando si debbano determinare le costanti di circuiti che non

Digitized by Google

contengono elementi variabili coll'intensità di corrente e colla d. d. potenziale. Come caso speciale importante ricordiamo la misura di una potenza, data (come quasi sempre in pratica) da una tensione sinusoidale con una corrente deformata. Poichè, come è noto, la potenza risulta dalle sole armoniche comuni alle due curve, basterà misurare l'ampiezza e la fase dell'armonica fondamentale della corrente e quindi il metodo potenziometrico è ancora applicabile.

3. Facendo uso dell'elettrodinamometro si può giungere alla determinazione del valore efficace e del prodotto medio di due grandezze alternative di *forma qualunque* seguendo il metodo indicato, che naturalmente non è più rigorosamente un metodo di opposizione. Esso presenta l'inconveniente che si devono poter alimentare le bobine fisse dell'elettrodinamometro colla d. d. p. da misurare o, almeno, con una della stessa forma e fase, ciò che in pratica non è sempre possibile. — Inoltre la corrente sottratta dalla bobina mobile può alterare le condizioni del circuito, a meno di ridurla convenientemente aumentando la resistenza ohmica in serie con essa, a scapito naturalmente della sensibilità. — Noi crediamo tuttavia, in base anche ai risultati sperimentali, che il metodo possa riuscire utile in molti casi: esso è d'altronde il solo che conservando gran parte dei pregi dei metodi di opposizione consenta la determinazione dei valori efficaci di grandezze alternative di forma qualunque.

Osserveremo infine che queste conclusioni hanno valore per i metodi del primo gruppo; si è già detto infatti che il metodo colla mutua induzione non è rigoroso se non per grandezze sinusoidali, conducendo altrimenti sempre alla sola determinazione delle armoniche fondamentali.

Correnti di dispersione.

Un inconveniente pure comune a tutti i metodi di opposizione è quello derivante dalle correnti di dispersione che possono percorrere l'organo galvanometrico. A dir vero l'inconveniente non è speciale ai potenziometri a corrente alternata, ma acquista qui ben maggiore importanza che non coi potenziometri a corrente continua per i valori spesso assai più elevati delle tensioni in giuoco e pel fatto che deve essere tenuto in conto anche la capacità dei circuiti. Oltre che le solite cautele di carattere generale (isolamento elevato, anelli e piastre di guardia, ecc.), è perciò

Digitized by Google

indispensabile disporre i circuiti come, ad esempio, nello schema della fig. 9 e non altrimenti. Bisogna, cioè, che esista un collegamento metallico diretto di resistenza minima fra i circuiti in esame ed il circuito di misura in modo che tutte le correnti di dispersione che tendono passare dall'uno all'altro circuito possano percorrerlo anzichè percorrere l'organo galvanometrico (Nel caso della figura la bobina mobile dell'elettrodinamometro). Anche con ciò, quando si faccia uso dell'elettrodinamometro, si possono avere dei disturbi per deficienza d'isolamento dell'apparecchio stesso e per azioni elettrostatiche, quando, essendo R notevole, la bobina mobile viene a trovarsi a notevole d. d. p. rispetto alle fisse. Ma è sempre possibile con opportuni accorgimenti mantenere gli errori derivanti in limiti accettabili. È tuttavia certo che sotto questo punto di vista un galvanometro a vibrazione o il telefono possono essere preferibili all'elettrodinamometro.

Vantaggi e pregi caratteristici dei vari metodi.

Un giudizio comparativo fra i diversi metodi di opposizione che siamo venuti esponendo non è certo facile, perchè tutti, se bene adoperati, possono condurre ad ottimi risultati. Tutti hanno già dato ottimi frutti nel campo diretto delle applicazioni ed ancora più ne daranno quando saranno meglio conosciuti e, come l'ordinario potenziometro a corrente continua, costituiranno parte essenziale di tutti i laboratori.

Noi tuttavia crediamo che anche fra essi sia possibile e razionale una scelta a seconda degli scopi che si vogliono raggiungere. Così pensiamo che quando si possa o si debba operare con frequenze elevate (oltre i 500 periodi) la disposizione potenziometrica tipica del secondo gruppo colla mutua induzione e col telefono sia assolutamente da preferirsi ad ogni altra.

Non è infatti in tal caso facile poter disporre di un alternatore polifase per alimentare il variatore di fase, mentre, in vista appunto dell'alta frequenza, la mutua induzione riesce poco ingombrante e consente di ottenere facilmente delle elevate d. d. p. Il telefono consente una grandissima sensibilità e non stanca l'operatore: infine la calcolazione dei risultati ed il tracciamento dei diagrammi riescono particolarmente facili e comodi. Solo inconveniente è la necessità di misurare esatta-

Digitized by Google

mente la frequenza, per il che è necessario ricorrere talora a metodi speciali.

Per le comuni applicazioni industriali, verifiche di istrumenti, e di trasformatori di misura, ecc. con frequenze ordinarie, noi pensiamo invece che le disposizioni del 1° gruppo siano sempre da preferirsi. Per ottenere delle d. d. p. appena un po' elevate la mutua induzione assume infatti grandi dimensioni, esagerate ancora dalla necessità di renderla astatica e certamente essa non può più reggere al confronto col variatore di fase ad induzione.

Per quanto riguarda l'apparecchio indicatore di zero noi, pur riconoscendo i pregi del galvanometro a vibrazione, crediamo sia da preferirsi l'elettrodinamometro, il quale non solo elimina ogni altro galvanometro per la taratura, riesce di maneggio affatto simile ai galvanometri a c. c. e permette la facile esecuzione di metodi speciali, ma dà risultati migliori di ogni altro apparecchio nei riguardi della forma della curva.

Applicazione del metodo colla mutua induzione e col telefono.

Ad esempio dell'importanza delle ricerche che si possono eseguire con questo metodo, riportiamo, in fig. 17, lo schema del metodo quale fu adoperato con ottimi risultati da uno di noi, nell'aprile 1909, per misure su cavi telefonici sottomarini nel Laboratorio della Ditta Pirelli e C. La fig. 18 mostra l'insieme della disposizione. Il metodo ha permesso di determinare, con sufficiente precisione, la tensione e la corrente nei diversi punti di una linea complessa e di studiare l'effetto difficilmente calcolabile dei traslatori.

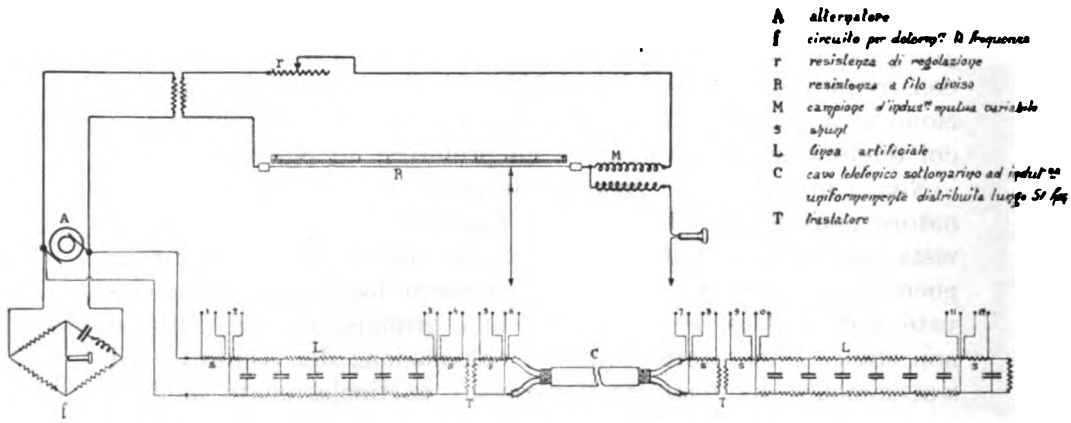


Fig. 17.

Digitized by Google

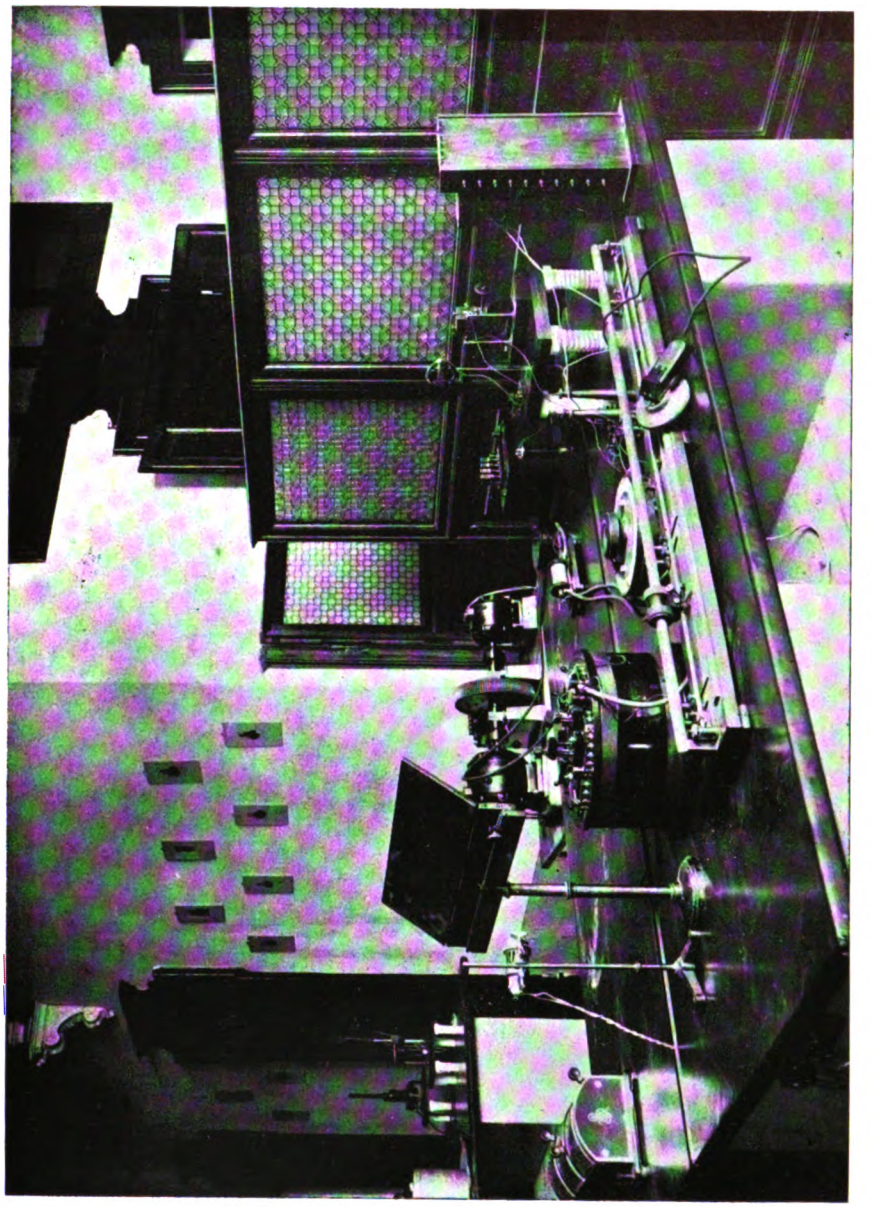


Fig. 18.

A. Barbagelata e L. Emanueli.

Digitized by Google

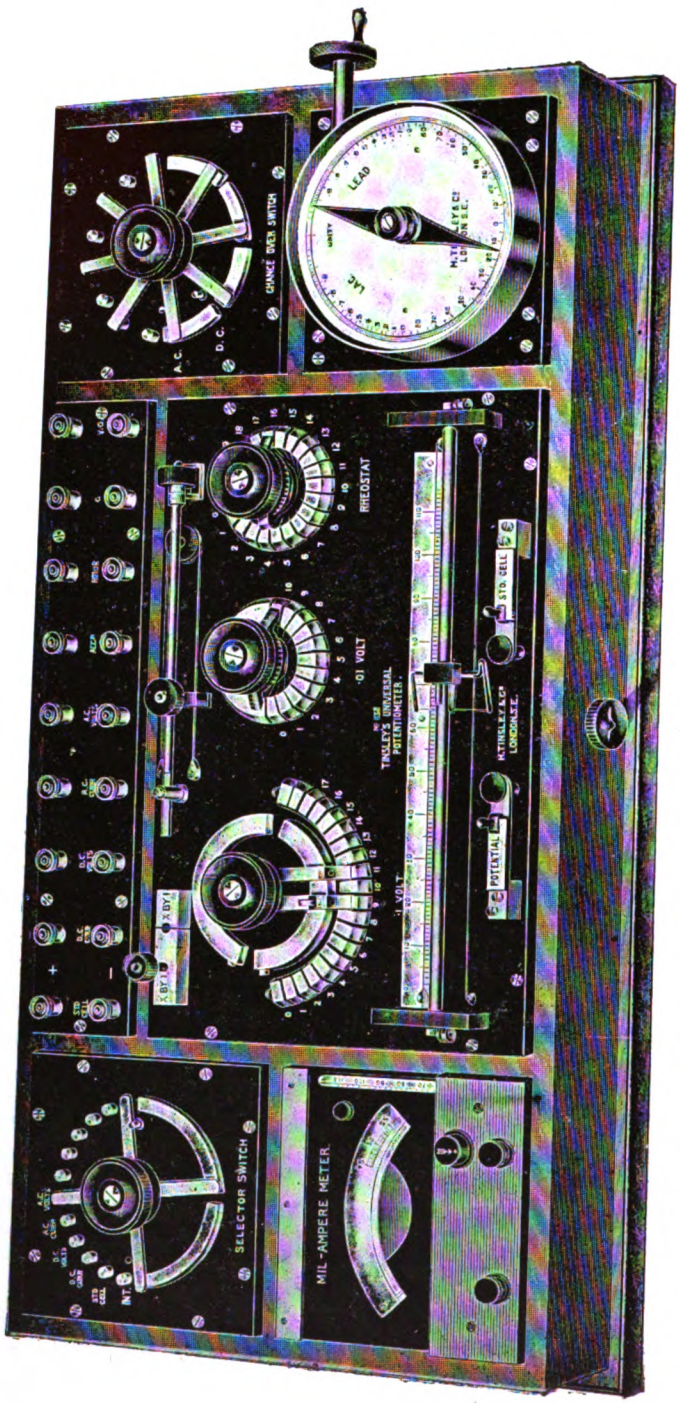


Fig. 19.

Digitized by Google

L'alternatore A alimenta tre circuiti distinti: il circuito potenziometrico, un circuito ausiliare per determinare la frequenza ed il circuito di prova. Il primo circuito è alimentato attraverso un trasformatore con rapporto eguale all'unità, il quale è bene sia espressamente costruito in modo che tra il primario e secondario vi sia un isolamento altissimo ed una piccolissima capacità; la resistenza r ha lo scopo di regolare l'intensità di corrente in modo da proporzionare la tensione del potenziometro alla tensione da misurare; la resistenza R era costituita da un filo di iridio teso lungo un'asta divisa in millimetri ed aveva una resistenza complessiva di circa 400 ohm.; il campione di induzione mutua era quello rappresentato dalla fig. 14 *b)*.

Il circuito ausiliare per la determinazione della frequenza era composto di un ponte di Weathstone, nel quale tre rami erano formati da semplici resistenze ohmiche, il quarto da un campione di selfinduzione in serie con una capacità variabile da un microfarad a zero per millesimi di microfarad. I lati del ponte sono regolati per l'equilibrio una volta tanto come se il quarto lato fosse costituito da una resistenza ohmica avente per valore la resistenza che in realtà ha il campione di selfinduzione. Per determinare il valore della frequenza si varia il valore della capacità nel quarto lato del ponte fino a che si ottenga il silenzio nel telefono posto sulla diagonale. È evidente che tale condizione di cose si ottiene quando la capacità e la induttanza sono in risonanza per la frequenza della corrente che percorre il circuito. L'unica avvertenza che va fatta per il calcolo della frequenza è questa: che i valori della capacità indicati sulle comuni cassette sono determinati balisticamente e sono quindi leggermente maggiori dei corrispondenti valori presentati a corrente alternata; nel condensatore da noi adoperato (in mica della casa Siemens) la correzione era del 3,5 $^0/_0$ alla frequenza 1000 e variava pochissimo variando il valore della frequenza tra 500 e 3000.

Il terzo circuito variava naturalmente a seconda delle misure; la figura rappresenta uno di questi circuiti destinato a studiare il collegamento di un cavo telefonico sottomarino ad induttanza distribuita uniformemente (tipo Kramp) con linee aeree alle due estremità. Le linee aeree erano rappresentate da due linee artificiali aventi un coefficiente di attenuazione all'incirca eguale ad uno; il cavo presentava un coefficiente di at-

Digitized by Google

tenuazione di circa 1,3. La linea era chiusa su un circuito avente la impedenza caratteristica dell'ultimo tronco.

Potenziometro Tinsley-Drysdale.

Fra le disposizioni pratiche del 1° tipo vuol essere innanzi tutto ricordato il potenziometro per corrente continua ed alternata costruito dalla casa H. Tinsley & Co. secondo le indicazioni del dott. Drysdale, il quale è, per quanto ci consta, l'unico apparecchio del genere che si trovi in commercio (Vedi figure 19 e 20).

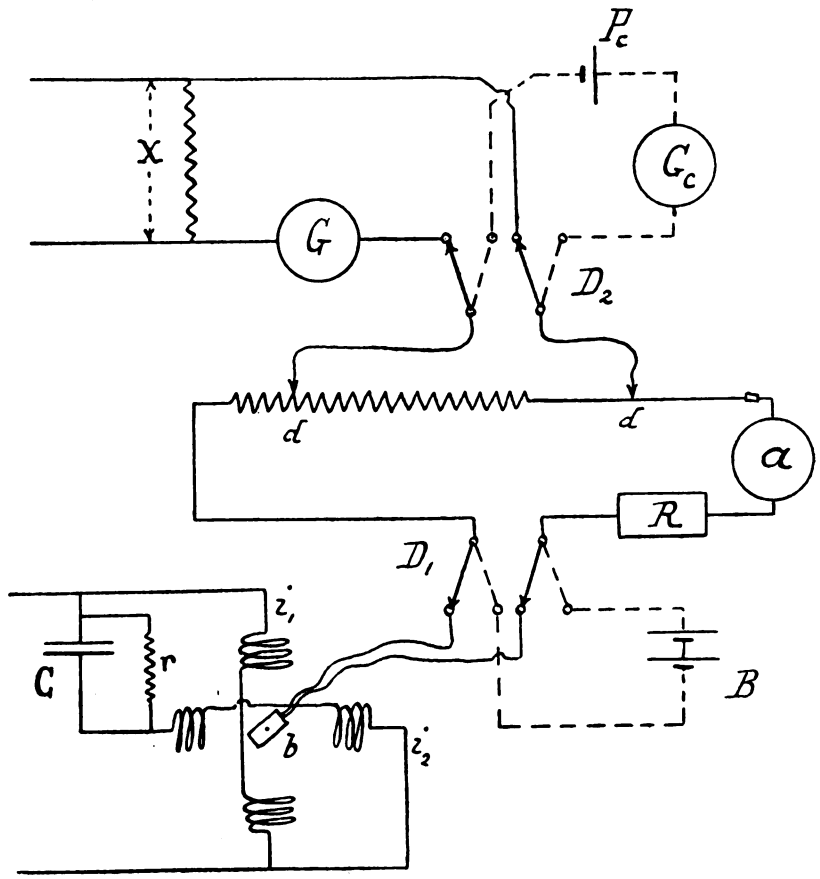


Fig. 20.

Il potenziometro, che ripete la disposizione tipica degli apparecchi del 1° gruppo, è costruito secondo il concetto dei soliti potenziometri per corrente continua, vale a dire è atto alla

Digitized by Google

misura diretta delle tensioni fino a 1,5 volt. Esso si tara infatti come gli ordinari potenziometri a corrente continua: girando i deviatori D_1 e D_2 verso destra si portano i contatti mobili *dd* in corrispondenza del valore attuale della f. e. m. della pila campione P_c. Indi si riduce a zero il galvanometro per corrente continua G_c regolando la resistenza R ed osservando, all'equilibrio, il valore indicato dal milliampermetro elettrodinamico *a*. — Basterà allora nelle successive misure con corrente alternata, eseguite col galvanometro a vibrazione G, che il milliampermetro sia sempre ricondotto a quella indicazione, per avere direttamente in volt il valore della d. d. p. misurata.

Il variatore di fase è del tipo a induzione. Il campo rotante è dato dalle due correnti i_1 i_2 spostate di un quarto di periodo e lo spostamento è ottenuto mediante la capacità C shuntata colla resistenza regolabile *r*, messa in serie con una delle coppie di bobine. La disposizione, evidentemente suggerita dal desiderio di non dover ricorrere ad un sistema polifase, non pare preferibile, in tesi generale, alle altre già ricordate, richiedendo un'accurata regolazione ad ogni variazione di frequenza.

Convenienza di abbandonare i criteri seguiti pei potenziometri a corrente continua.

L'apparecchio molto raccolto e ben studiato nei suoi particolari costruttivi deve rendere indubbiamente ottimi servigi, ma noi non crediamo sia molto razionale il criterio di costruire un potenziometro per correnti alternate seguendo i concetti dei soliti potenziometri per correnti continue. La limitazione ad 1,5 volt del campo di applicazione diretta è per questi sufficientemente giustificata dal loro scopo precipuo. Sorti per il paragone della f. e. m. delle pile campioni, ed applicati in seguito più specialmente alla misura di piccole resistenze o di intensità coll'intermediario di shunt tarati, quando devono servire alla misura di tensioni superiori al volt e mezzo, possono, senza inconvenienti, ricorrere al noto artificio del *multiplyer*, misurando cioè una frazione della tensione totale applicata ad una resistenza suddivisa in frazioni note. L'uso del *multiplyer* colle correnti continue è sempre infatti ammissibile, perchè quand'anche la corrente da esso assorbita potesse lievemente alterare le condizioni del circuito, una correzione di facilità elementare permette di tenerne conto.

Digitized by Google

Ma colle correnti alternate non è più così: la corrente sottratta dal *multiplyer*, non solo in molti casi modifica le condizioni del circuito in esperimento (per esempio nella misura del rapporto nominale dei trasformatori di misura), ma sempre altera più o meno le relazioni di fase dei diversi elementi del circuito stesso. — È quindi necessario di conservare in ogni caso al metodo di opposizione il suo pregio specifico: di dare cioè la misura di una d. d. p. senza sottrarre corrente. E per questo è necessario estendere il campo di applicazione diretta dell'apparecchio aumentando la tensione agli estremi del circuito potenziometrico.

In secondo luogo anche il concetto di voler ottenere direttamente il risultato in volt, ci sembra più fertile di inconvenienti che non di vantaggi. Per seguire razionalmente tale concetto infatti non si dovrebbero eseguire letture se non quando l'indice del milliampermetro di riferimento si trovi esattamente sulla divisione voluta. Ora pare che da ciò possa derivare una notevole perdita di tempo, venendosi a perdere uno dei pregi caratteristici di questi metodi di opposizione per correnti alternate, di cui già si è fatto cenno: la pratica indipendenza dei risultati dalle inevitabili oscillazioni di tensione del circuito.

Che se proprio si volesse giungere alla lettura diretta in volt rinunciando in parte alla speditezza, il meglio sarebbe di eliminare addirittura il milliampermetro, organo intermediario che può sempre essere causa di errori fortuiti e limita sempre l'approssimazione assoluta dei risultati. Uno di noi ha altra volta proposto alcuni metodi speciali pel confronto diretto in un solo apparecchio delle correnti continue colle correnti alternate: ora è chiaro che accoppiando mediante uno di tali apparecchi o con altro equivalente (come sarebbe, per esempio, il *comparatore* del Northrup od anche un sistema di pile termoelettriche collegate in opposizione), un potenziometro per corrente alternata ad un potenziometro per corrente continua, si potrebbe ottenere il confronto diretto ed immediato di una qualunque grandezza alternativa colla f. e. m. di una pila campione. La fig. 21 dà lo schema di una simile disposizione. C è il comparatore, il quale è un apparecchio per riduzione a zero, S è una resistenza regolata in modo che quando la corrente i_c che la percorre ha il valore normale, si abbia ai suoi estremi una d. d. p. uguale alla f. e. m. della pila campione P_c. — Ridotti a zero il galvanometro per corrente continua G_c ed il comparatore C ($i_a = i_c$) agendo

Digitized by Google

rispettivamente sui reostati R_a ed R_c, si deve ridurre a zero il galvanometro per corrente alternata G_a operando come al solito sul variatore di fase F e sul contatto d: ottenuto lo *zero contemporaneo* nei tre apparecchi si potrà leggere direttamente in volt il valore della tensione misurata. È facile comprendere quanto grande dovrebbe essere il tempo richiesto da ogni misura e le misure poi sarebbero assolutamente impossibili senza un'assoluta costanza delle f. e. m. che alimenta il circuito alternativo. Non crediamo pertanto alla praticità di una simile disposizione e pensiamo che il meglio sia ancora di ricorrere ad

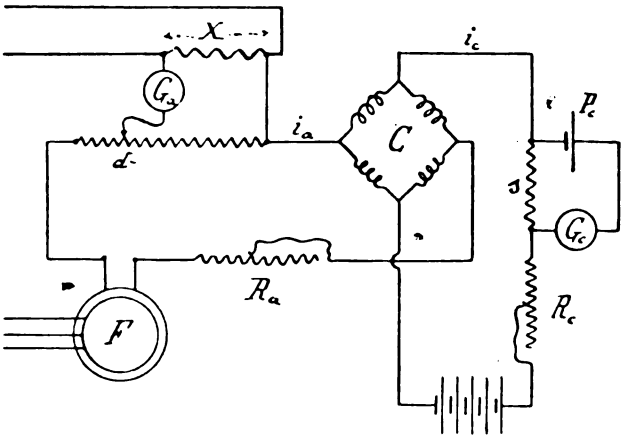


Fig. 21.

un buon milliampermetro, ma senza aver la pretesa di ricondurlo sempre all'identica deviazione: basterà tener conto della sua indicazione e curare che essa non si scosti mai troppo dai valori per cui è stata fatta la taratura in posto.

D'altra parte, come già dicemmo, la nozione esatta della corrente che percorre il circuito potenziometrico in molti casi non è neppur necessaria. — Non si deve infatti perdere di vista che l'applicazione pratica più importante dei metodi d'opposizione colle correnti alternate sarà pur sempre quella da cui essi trassero origine: le prove e lo studio dei trasformatori di misura.

Ora è ovvio, considerando per esempio il caso di una misura diretta di rapporto, che il doppio paragone successivo della tensione primaria e della secondaria con una stessa tensione ausiliaria, alimentante il potenziometro, non potrebbe in nessun modo consentire la necessaria precisione.

Digitized by Google

Bisogna in tali casi assolutamente opporre sempre la minore delle due tensioni del trasformatore ad una frazione della maggiore; valersi cioè di quest'ultima per alimentare direttamente il circuito potenziometrico.

Per tutto ciò noi pensiamo, riassumendo, che più di *potenziometro* colle correnti alternate si debba parlare di *disposizioni potenziometriche*, e che queste debbano essere studiate in modo da consentire una grande elasticità, cosicchè possano facilmente adattarsi agli scopi più disparati. E perciò anche pensiamo che la soluzione più generale sia ancora quella data dall'elettrodinamometro.

Installazione del Politecnico di Milano.

A dimostrazione dell'asserto nulla ci pare più opportuno di una breve descrizione della disposizione installata nel Laboratorio dell'Istituzione Elettrotecnica Carlo Erba (Politecnico di Milano). La fig. 22 dà lo schema generale delle disposizioni di cui la fig. 23 mostra l'insieme.

Il circuito potenziometrico è costituito da tre cassette a spine: una costituisce le parti c, d, e; le altre due a, b, in serie fra loro, sono derivate sulla frazione d della prima. Le due cassette a e b sono gemelle in modo che riesce facile e comodo mantenere costante la somma $a + b$. — La disposizione indicata fu in parte suggerita da necessità economiche, e sarà sperabilmente presto sostituita da una disposizione tipo Thomson-Warley, ma essa fu anche voluta per poter variare, ogni qualvolta sia conveniente, la resistenza assoluta delle varie parti del circuito. — Agli estremi del circuito si può applicare una tensione massima di 75 volts, ma si può raddoppiare la portata della disposizione portando il milliampermetro ma col suo invertitore H dai morsetti A di sinistra (com'è in figura), a quelli B di destra. — Poichè il milliampermetro è in realtà un voltmetro per 75 volts, ed ha una resistenza interna uguale alla resistenza massima del circuito potenziometrico, si comprende come, lasciandolo come in figura, si possono misurare le tensioni fra zero e 75 volts, portandolo in B, quelle fra 75 e 150 volts. L'invertitore H è reso necessario dal fatto che, non essendo il milliampermetro di tipo astatico, esso sente l'influenza del campo terrestre, cosicchè per la taratura si richiedono due letture a poli invertiti.

Digitized by Google

Fig. 22.

A. Barbagelata e L. Emanueli.

Digitized by Google

Digitized by Google

La cassetta R_o in serie colla bobina mobile dell'elettrodinamometro serve a ridurre, quando occorra, la corrente che la percorre. Analogamente la r_o serve a regolare la corrente I_o nelle bobine fisse, della quale l'ampermetro a_o dà un'idea. — In pratica la r_o si è ottenuta molto semplicemente e colle migliori garanzie nei riguardi della non induttività con alcune lampadine ad incandescenza di vario tipo collegabili in parallelo.

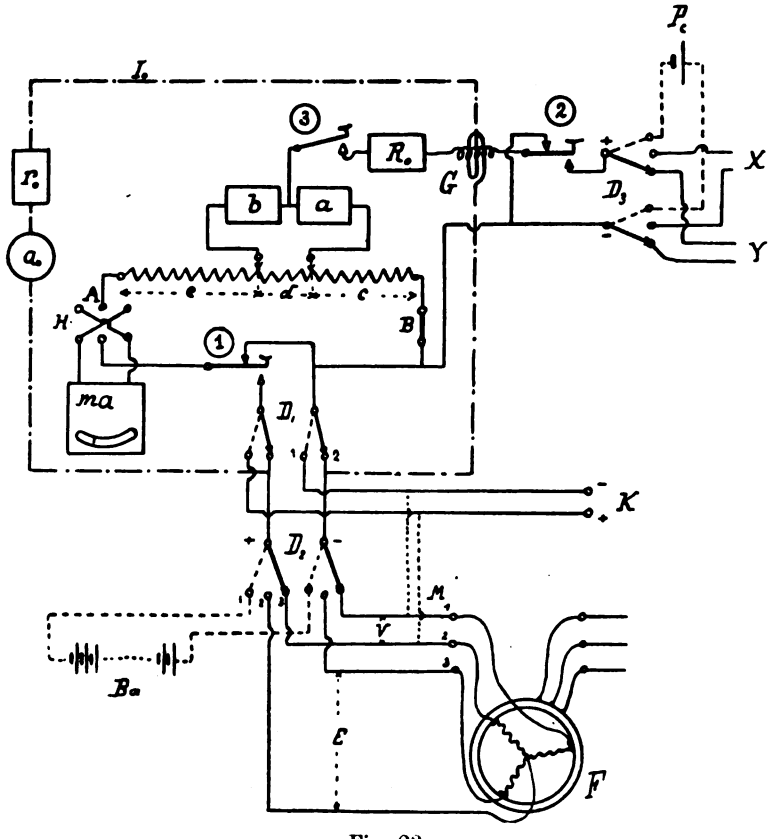


Fig. 23.

In G è l'elettrodinamometro a riflessione costruito completamente in laboratorio. — La fig. 24 mostra l'insieme dell'apparecchio. — In esso la bobina mobile, rettangolare, in tutto simile a quelle dei galvanometri D'Arsonval, è sospesa ad un sottile nastrino di bronzo fosforoso ($0{,}2 \times 0{,}015$ mm.) che costituisce anche uno dei conduttori della corrente, l'altro essendo costituito da un filo di rame di $^4/_{100}$ di mm. senza tensione, in modo

Digitized by Google

che non contribuisce in misura apprezzabile a creare la coppia autagonista. I lati verticali della bobina mobile vengono a trovarsi nell'interno delle due bobine fisse, le quali non concedono alla bobina mobile che uno spostamento angolare di pochi gradi più che sufficiente per un istrumento letto per riflessione ed usato pressochè sempre per riduzione a zero. — Con questa disposizione si utilizza al massimo grado il flusso creato dalle bobine fisse e si raggiunge facilmente un'elevata sensibilità.

I dati costruttivi dell'apparecchio sono i seguenti:

bobina mobile 590 spire di filo rame di $^{8}/_{100}$ di mm. di diametro
$R = 94$ ohm $l = 0{,}007$ henry;
bobine fisse 600 spire ognuna di filo di rame di $^{4}/_{10}$ di mm.
resistenza complessiva (in serie) 29 ohm
induttanza „ $l = 0{,}021$ henry;

sensibilità (scala a m. 1,20 dallo specchio)

$$\delta = 25\, I\, i$$

essendo I ed i le correnti nelle bobine fisse e mobili, in milliampere.

Pertanto con una corrente $I = 0{,}3 \equiv 300$ milliampere, perfettamente ammissibile per funzionamento di non eccessiva durata, si ha una deviazione di 7,5 divisioni per microampere nella bobina mobile.

Delle tre chiavi la (1) e la (2) hanno l'ufficio che già si è detto (V. pag. 893), la (3), che è una semplice chiave di interruzione, non sarebbe necessaria se fosse sempre possibile abbassare nel medesimo istante la (1) e la (2). — Essa è appunto destinata ad eliminare gli urti che riceve la bobina mobile se la chiusura dei due tasti (1) e (2) non è sincrona. Normalmente la chiave (3) è abbassata, mente le (1) e (2) sono sollevate in modo che l'elettrodinamometro si porta sulla posizione di falso zero: per la misura si apre momentaneamente la chiave (3) mentre si chiudono la (1) e la (2); poi subito si richiude la (3). — All'apertura del circuito si procede inversamente.

Lo scopo dei deviatori D_2 e D_3 è evidente: quello del deviatore D_1 vedremo a suo tempo: intanto, a semplificazione del seguito, indicheremo come posizione normale dei deviatori D_1

Digitized by Google

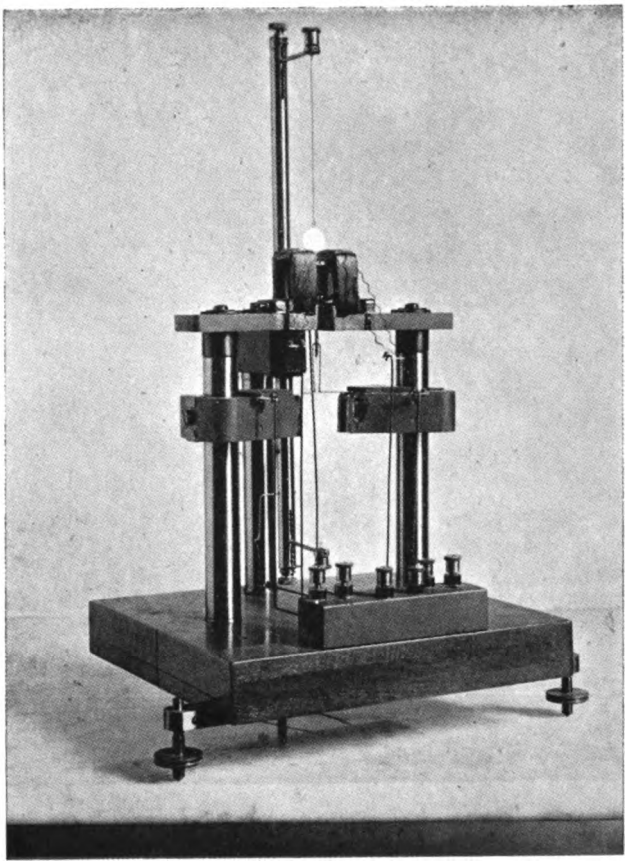


Fig. 24.

Digitized by Google

Digitized by Google

e D_2 quella della figura, intendendo che ove non siano date indicazioni in proposito, i due deviatori si devono supporre in posizione normale.

Così pure chiameremo *senso positivo* della deviazione quello che si ottiene chiudendo le sole chiavi (1) e (3). — Tale senso è fisso ed immutabile se non si mutano le connessioni dello schema.

Finalmente riterremo sempre che le connessioni al variatore di fase F siano fatte in modo che la tensione di fase E risulti spostata *in ritardo* (di 90°) rispetto alla tensione concatenata V.

Ciò premesso, riesce facile considerare l'uso della disposizione nei vari casi.

Caso generale. — Misura della grandezza e relazione di fase di due o più d. d. p. (X, Y, Z.....), tutte minori della tensione V.

a) *Taratura.* — Deviatore D_2 a sinistra, D_3 in alto (pila campione). — Il circuito del potenziometro viene così alimentato dalla batteria B_a la cui tensione deve essere dell'ordine di V.

Procedendo per opposizione si riconduce G al falso zero, e si ha:

$$P_c = \left(c + a\frac{d}{a+b+d}\right) K\,\delta_m;$$

essendo δ_m la media delle due letture eseguite al milliampermetro, a poli invertiti. Si ricava:

$$K = \frac{P_c}{\delta_m\left(c + a\frac{d}{a+b+d}\right)}.$$

Naturalmente si scelgono sempre i valori di $a+b$ e di d in modo che il termine costante $\frac{d}{a+b+d}$ abbia un valore decimale esatto.

b) Per la *misura* si segue sostanzialmente il procedimento già indicato, e quindi:

1° Portato D_2 nella posizione di mezzo (su E) e D_3 su X, chiudendo solo (2) e (3) (R_o grande) si manovra il variatore di fase fino a ridurre G a zero (E in quadratura con X);

2° riportato D_2 in posizione normale si osserva se chiudendo solo (2) e (3) la deviazione è negativa. — Se non lo fosse si ruota F di 180°;

Digitized by Google

3° si regolano le resistenze del potenziometro per ridursi a zero (R_o minimo): sarà

$$X = K\,\delta_x\left(c_x + a_x\,\frac{d}{a+b+d}\right).$$

4° portato D_3 su Y si chiudono solo (2) e (3) (R_o grande). — A seconda che la deviazione è negativa o positiva, è φ minore o maggiore di 90°. — Portato D_2 in mezzo, si chiudono (2) e (3): a seconda che la deviazione è positiva o negativa, Y è in anticipo o in ritardo su X.

Naturalmente nella maggior parte dei casi pratici questa indagine qualitativa si può ommettere, conoscendosi in generale *a priori* le relazioni di fase approssimate fra le varie d. d. p. che si devono misurare;

5° Lasciando D_3 su Y e D_2 in mezzo, chiuse (2) e (3), si manovra il variatore F fino a ricondursi a zero (E in quadratura con Y) e si legge l'angolo α di cui si è dovuto ruotarlo; sarà:

$$\alpha = \varphi.$$

6° Riportato D_2 in posizione normale, si procede ad una nuova opposizione da cui

$$Y = K\,\delta_y\left(C_y + A_y\,\frac{d}{a+b+d}\right).$$

Ed il ciclo delle operazioni si ripete per quante sono le d. d. p. da misurare.

Si è con ciò finora supposto che gli errori dovuti all'induttanza dei circuiti di G e all'imperfetta ortogonalità di E con V siano trascurabili. Se non lo fossero si predispongono i collegamenti fra i morsetti M_2 e K + e fra M_1 e K, indicati in punteggiato, e dopo la prima opposizione, di cui al N° 3:

3 *bis*) Si porta D_1 a sinistra e D_2 in mezzo, e chiuse le tre chiavi, se si ha deviazione si regola il variatore fino a ridursi a zero. Indi rimessi i deviatori in posizione normale, si regolano, se è necessario, i valori di a e b per ridursi a zero ottenendo i valori esatti da introdursi nelle formule.

Analogamente dopo ogni nuova opposizione.

Fra i molti casi di applicazione di questo metodo generale ricorderemo le misure di induttanza, di capacità di piccolissime potenze (misurando tensione e d. d. p. agli estremi di uno shunt) e misure di correnti.

Digitized by Google

Casi speciali. — La disposizione ed il procedimento possono essere grandemente semplificati in taluni casi, come, p. es., per la misura di tensioni o potenze o, per essere più esatti, per la verifica diretta di voltmetri e di wattmetri con correnti alternate.

a) Verifica di voltmetri. — Lo schema si riduce a quello della fig. 25 ed il procedimento è ovvio. Il circuito è alimentato a tensione costante. Spostando il contatto *e* si varia la tensione

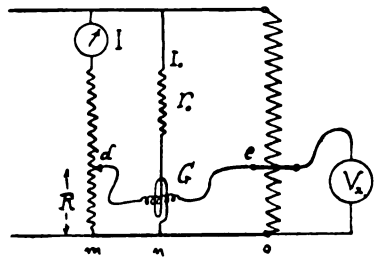


Fig. 25.

V_x applicata al voltmetro in prova; ricondotto a zero l'elettrodinamometro, variando la R si ha senz'altro:

$$V_x = IR.$$

È qui necessario che la connessione fra i punti *m*, *n*, *o*, sia di resistenza assolutamente trascurabile: diversamente si ha un errore sistematico. — Se ne può tener conto perchè facendo $V_x = 0$ si dovrà dare ad R un piccolo valore R_o per riportare G allo zero. Sarà con ciò evidentemente

$$V_x = I(R - R_o).$$

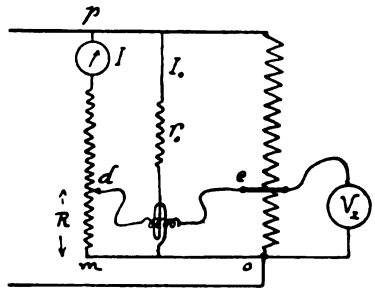


Fig. 26.

Digitized by Google

Se, come è possibile, la corrente lungo la connessione *m o* non è costante, anche il termine correttivo R_o varierà. — Può essere pertanto preferibile la disposizione della fig. 26.

Con essa fatto $V_x = 0$ ed $R = 0$, si avrà una piccolissima deviazione positiva dovuta alla caduta di tensione nel tratto *o m*. Basterà allora assumere tale valore della deviazione come falso zero e procedere come d'ordinario.

Il valore di I è dato dal milliampermetro che si tara come pel caso generale.

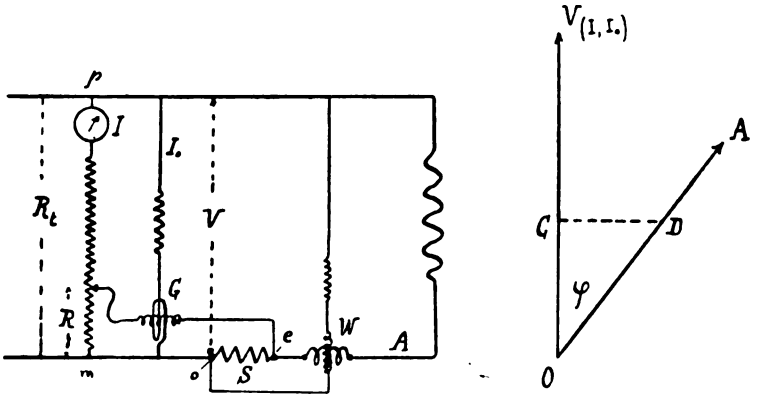


Fig. 27.

b) *Verifica dei wattmetri.* — La fig. 27 dà invece lo schema ed il diagramma relativi alle misure di potenze (verifiche di wattmetri), secondo un procedimento che è assai più spedito del vero procedimento potenziometrico, rimanendo in ogni caso esatto per quanto riguarda la forma della curva. — Lo shunt non induttivo S messo in serie colla bobina ampermetrica del wattmetro dà luogo ad una d. d. p. ai suoi estremi $A \times S = OD$. Ridotto a zero l'elettrodinamometro variando R si avrà evidentemente:

$$IR = OC = \overline{OD} \cos \varphi$$

ossia

$$IR = AS \cos \varphi.$$

D'altra parte è evidentemente

$$IR_t = V,$$

cosicchè

$$W = VA \cos \varphi = \frac{I^2 R_t R}{S}.$$

Digitized by Google

Si ha pertanto con una sola misura il valore della potenza. Anche qui è necessario che la connessione $m - o$ sia di resistenza nulla: la cosa è anzi tanto più importante in quanto la corrente che la percorre può essere assai rilevante. È anche qui possibile modificare lo schema come si è indicato pel caso precedente in modo da potere facilmente tener conto dell'errore sistematico.

Un secondo errore sistematico, di fase, può aversi per φ notevoli, dovuto all'induttanza delle bobine dell'elettrodinamometro.

È facile vedere che se gli angoli η ed ε già definiti sono uguali, l'errore si annulla, avendo esso per espressione

$$\operatorname{sen}(\varepsilon - \eta)\operatorname{tg}\varphi.$$

Con gli ordinari sfasamenti esso riesce sempre assolutamente trascurabile.

Il valore di I si ha al solito dal milliampermetro tarato come d'ordinario. È ovvio che l'errore percentuale nella misura sarà il doppio di quello del milliampermetro.

L'adattamento dello schema generale della fig. 22 a questi due casi speciali riesce intuitivo. Il variatore di fase è eliminato, bastando collegare i morsetti M_1 M_2 coi punti o p del circuito di misura, ed il deviatore D_3 coi punti e o. Quanto ai risultati basta tener conto che nel primo caso della misura di tensione la R delle formule sarà data come al solito da

$$R = c + a\frac{d}{a+b+d}.$$

Per le misure di potenza, poichè la d. d. p. agli estremi dello shunt è sempre piccola, sarà sempre $c = o$, cosicchè comprendendo nel valore di e anche la resistenza interna del milliampermetro avremo:

$$R = a\frac{d}{a+b+d}; \qquad R_t = e + \frac{d(a+b)}{a+b+d};$$

e poichè $a + b = D =$ costante ed $I = K\delta$ avremo finalmente:

$$W = \frac{K^2\delta^2}{S}a\frac{d[e(D+d)+dD]}{(D+d)^2} = C \cdot a\delta^2.$$

Anche qui i valori di d, e e D sono predisposti in modo da ottenere delle costanti decimali esatte.

Digitized by Google

c) *Prova diretta dei trasformatori di misura.* — Fra i parecchi metodi e le moltissime varianti proposte ci si è attenuti allo schema della fig. 28, che si riferisce alla prova dei trasformatori di tensione. La disposizione ha il vantaggio che il trasformatore in prova T, il quale può anche essere ad

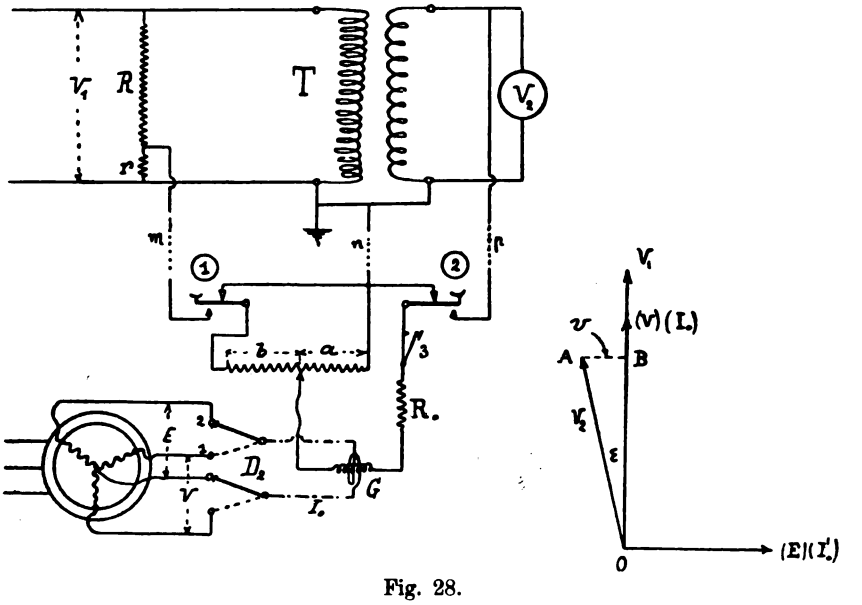


Fig. 28.

altissima tensione, può essere tenuto in un locale completamente distinto da quello in cui si lavora, bastando tre conduttori *m n p* tutti a bassa tensione a stabilire i necessari collegamenti col circuito di misura. La tensione V che alimenta il primario, alimenta anche le resistenze R ed *x* in serie fra loro, di valore proporzionato a quello della tensione. Servono per esse egregiamente le ordinarie resistenze addizionali da voltmetri o da wattmetri. La *r* deve essere scelta in modo che la d. d. p. ai suoi estremi sia sempre alquanto superiore alla tensione del secondario. Il voltmetro V sta a rappresentare il carico sul secondario del trasformatore: esso può essere eliminato qualora interessi il rapporto a vuoto. Osserviamo subito che lo schema deriva facilmente da quello della fig. 22; basta fare in questo $c = e = d =$ e mettere in corto circuito il milliampermetro *m a* che qui non serve. Basterà poi che i conduttori *n m* facciano capo ordinata-

Digitized by Google

mente ai morsetti K — K + (deviatore D a sinistra) ed ancora p e n ai morsetti $+ e -$ del deviatore D_3.

I valori di a e b devono essere i più grandi possibili, in generale $a + b =$ costante $= 10000$ ohm. R_o deve essere pure grande, circa 10000 ohm: con ciò ogni preoccupazione per gli errori di mutua ed auto induzione della bobina mobile è senz'altro eliminata.

Il procedimento è il seguente:

1) Portato D_2 su 2 in corrispondenza della tensione E (posizione di mezzo nello schema generale), si manovra il variatore F fino a ridursi a zero (E in quadratura con V_1);

2) Riportato D_2 in posizione normale (in corrispondenza della tensione V), si procede per opposizione regolando a e b colle tre chiavi chiuse, fino a ridursi a zero.

Si ottiene con ciò la relazione

$$\frac{V_1}{V_2 \cos \varepsilon} = \frac{R(r + D) + rD}{ra} \tag{1}$$

che nella grande maggioranza dei casi dà senz'altro il rapporto:

$$K_o = \frac{V_1}{V_2},$$

essendo praticamente $\cos \varepsilon = 1$.

Durante la misura, in prossimità delle condizioni di equilibrio, si determina quale variazione $\Delta\delta$ si ha nella deviazione per una variazione nota Δa nella resistenza a. Sarà evidentemente

$$\Delta\delta = c\, I_o\, V_2 \frac{\Delta a}{a} \tag{2}$$

essendo I_o la corrente nelle bobine fisse e c un coefficiente che dipende dalla sensibilità dell'elettrodinamometro e dalle condizioni del circuito.

3) Si riporta D_2 in corrispondenza di E. Chiuse le tre chiavi si avrà una deviazione

$$\delta = c\, I_o'\, v \tag{3}$$

essendo I_o' la nuova corrente nelle bobine fisse. Dalle (2) e (3) si ricava

$$\frac{v}{V_2} = \frac{I}{I'} \frac{\Delta a}{\Delta\delta} \frac{\delta}{a}$$

Digitized by Google

ma $v/V_2 = \operatorname{sen}\varepsilon \cong \varepsilon$, e $I_o/I_o' = \sqrt{3}$, cosicchè finalmente si ha l'angolo di fase ε dalla relazione

$$\varepsilon = \sqrt{3}\,\frac{\Delta a}{\Delta \delta}\,\frac{\delta}{a}.$$

Per la prova diretta dei trasformatori di corrente schema e procedimento sono del tutto analoghi. La fig. 29 mostra la parte

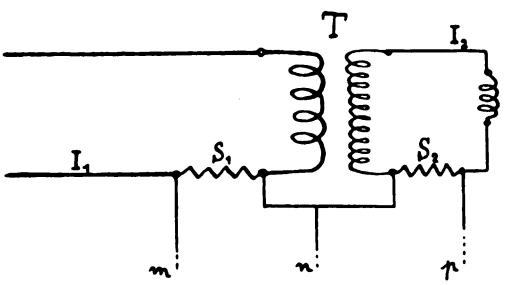


Fig. 29.

del circuito che si riferisce al trasformatore in prova T il quale può ancora essere collocato in altro locale di quello delle misure. Sul primario è inserito lo shunt non induttivo S_1, sul secondario, in serie cogli apparecchi che costituiscono il carico del trasformatore, si ha lo shunt S_2. Deve essere $I_1\,S_1\,I_2\,S_2$. I tre conduttori $m\,n\,p$ stabiliscono le connessioni col circuito di misura, il quale è identico come schema al precedente; solo per ragioni di sensibilità devono $a\,b$ ed R piccoli. In generale $a + b = D = 100$; $R = 100$.

Anche il diagramma del metodo resta ancora quello della fig. 28 quando si supponga $V_1 = I_1\,S_1$ e $V_2 = I_1\,S_2$, e pure identico rimane il procedimento.

Con una prima opposizione di $I_2\,S_2$ a $I_1\,S_1$ si determina il rapporto con la relazione

$$I_1\,S_1\,\frac{a}{D} = I_2\,S_2\cos\varepsilon$$

da cui, nella maggior parte dei casi, potendosi porre $\cos\varepsilon = 1$,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_2}{S_1}\,\frac{D}{a}.$$

Digitized by Google

Durante la misura, in prossimità delle condizioni di equilibrio, si osserva la variazione $\Delta\delta$ portata da una Δa variazione nella resistenza a. Sarà:

$$\Delta\delta = c\, I_o\, I_2\, S_2 \frac{\Delta a}{a}.$$

Indi alimentando le bobine fisse dell'elettrodinamometro colla tensione E (in quadratura con $I_2 S_2$) si avrà una deviazione

$$\delta = c\, I'_o\, v$$

e finalmente

$$\frac{v}{I_2 S_2} = \operatorname{sen}\varepsilon \leqq \varepsilon = \sqrt{3}\, \frac{\Delta a}{\Delta\delta}\, \frac{\delta}{a}.$$

d) ***Prova indiretta dei trasformatori di misura.*** — La disposizione, infine, può essere facilmente applicata allo studio indiretto dei trasformatori di misura, secondo il procedimento che uno di noi ebbe altra volta a proporre e pel quale rinviamo il lettore agli Atti dell'Associazione Elettrotecnica (settembre-ottobre 1910).

Digitized by Google

BIBLIOGRAFIA

1. D. Drysdale. — *The use of the Potentiometer on Alternate Current Circuits.* " Proceedings of the Physical Society „, 22 Gennaio 1909. Riassunto e discussione. " The Electrician „, LXII, 19 Febbraio 1909, pag. 723.
2. H. Tinsley. — *A remarkable Vector Diagram.* " The Electrician „, 18 Novembre 1910.
3. C. V. Drysdale. — *Some Measurements on Phase Displacements.* " The Electrician „, 24-31 Agosto 1906 - 16 Novembre 1906.
4. L. T. Robinson. — *Electrical Measurements on circuits requiring current and potential transformers.* " Proceedings of the Am. Inst. of El. Engeneers „, Luglio 1909.
5. Clayton H. Sharp and W. W. Crawford. — *Some recent developments in exact alternating current measurements.* " Proceedings of A. I. E. E. „, Luglio 1910.
6. Agnew & Ficht. — *Determination of Constants of shunt and series transformers.* " Elect. World „, 28 Ottobre 1909.
7. F. A. Laws. — *Determination of Constants of Istrument transformers.* " El. World „, 27 Gennaio 1910.
8. A. Barbagelata. — *Prova indiretta dei trasformatori di misura per forti intensità di corrente.* " Atti A. E. I. „, Settembre-Ottobre 1910.
9. A. Larsen. — *Der komplexe Kompensator.* " E. T. Z. „, 13 Ottobre 1910.
10. A. E. Kennelly; H. G. Crane & J. W. Davis. — *A new and direct process of producing alternating current vector diagrams experimentally.* " El. World „, 30 Marzo 1911.
11. Drysdale. — *The use of phase shifting transformer for Wattmeter testing.* " The Electrician „, 11 Dicembre 1908.
12. Gyozo Semplen. — *Observation of alternate current with the string Galvanometer.* " The Electrician „, 6 Settembre 1907. Vol. 59, pag. 834. Translated from the " Physicalische Zeitschrift „, 1° Luglio 1907.
13. W. Duddel. — *A bifilar vibration galvanometer.* " The Electrician „, 4 Giugno 1909. Vol. 63, pag. 301.
14. A. Campbell B. A. — *On the measurement of mutual inductance by the aid of a vibration galvanometer.* " The Electrician „, 25 Ottobre 1907. Vol. 60, pag. 60. *From the National Physical Laboratory.* Abstract of a paper read before the " Physical Society „.
15. H. Rubens. — *Vibration Galvanometer.* " Wiedeman Annales „, 1895. Vol. 56, pag. 27.

Digitized by Google

16. H. ABRAHAM. — *Galvanomètre à courant alternatif.* " Comptes-rendus de l'Académie des Sciences „, CXLII, pag. 993.
17. WENNER. — *Vibration galvanometer.* " Electrical World „, Marzo 1910.
18. STEINMETZ. — *Discussion on exact alternating current measurement.* " Proceedings A. I. E. E. „, Novembre 1910, pag. 1774.
19. D. E. SUMPNER and W. C. S. PHYLLIPS. — *A Galvanometer for Alternate Current circuits.* Lettura alla " Physical Society „, 10 Giugno 1910. " The Electrician „, 24 Giugno e 9 Settembre 1910.
20. GUINCHANT. — " Ecl. Elec. „, 10 Luglio 1909.
21. A. BARBAGELATA. — *Sul confronto diretto delle correnti alternate colle correnti continue.* " Atti A. E. I. „, 1908.
22. H. ARMAGNAT. — *The Electrolitic Detector.* " The Electrician „, 4 Gennaio 1907. Vol. 58, pag. 461. Abstracted from the " Journal de Physique „, Novembre 1906.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Introduction. — *Les Auteurs, après avoir rappelé comme on a su vaincre les difficultés qui s'opposaient à l'usage des méthodes de mesure par compensation (dont les avantages sont universellement connus) avec les courants alternatifs, classent les différentes dispositions aujourd'hui en usage en deux groupes: le premier comprenant les dispositions où l'on varie la phase du courant dans le circuit potentiométrique jusqu'à sa coïncidence avec la d. d. p. X à mesurer; le deuxième, celles où l'on équilibre la d. d. p. X avec deux différences de potentiel ortogonales, réglables.*

Premier groupe. — *Les AA. décrivent les appareils essentiels des différentes dispositions: c'est à dire:*

a) les appareils déphasateurs *à deux types: à résistance et à induction. — Ces derniers sont toujours à préférer: ils n'introduisent pas d'erreur appréciable par l'imparfaite correspondance entre l'angle mécanique de rotation et l'angle électrique de déphasage: et il n'est à craindre aucune nuisible déformation dans la courbe du courant;*

b) les appareils indicateurs de zéro. — *Les AA. étudient spécialement:*

1. le téléphone;

2. le galvanomètre à vibration, dont ils exposent sommairement la théorie en concluant qu'il faut réduire au minimum les dimentions de la partie oscillante afin d'augmenter la sensibilité voltmétrique sans préjudice de la sensibilité ampèremétrique;

3. l'électrodynamomètre, en excitant ses bobines fixes avec un courant auxiliaire. Cet appareil pourrait paraître peu indiqué, soit parce qu'on peut le réduire au zéro même lorsque le courant dans la bobine mobile est décalé de 90° avec celui des bobines fixes, soit à cause de la self-induction et de l'induction mutuelle de ses bobines; au contraire il est d'un maniement très commode, et les erreurs peuvent être tout à fait éliminées;

4. les redresseurs *mécaniques et électrolytiques du courant, permettant l'emploi des galvanomètres ordinaires pour courant continu.*

Digitized by Google

Deuxième groupe. — *Il comprend deux types de dispositions:*

a) celles qui ont recours à induction mutuelle réglable fournissant la composante normale à la d. de p. du circuit potentiométrique;

b) celles qui emploient un système de courants diphasés.

Applications:

a) Considérations générales. — *Les AA. étudient spécialement l'influence de la forme de la courbe du courant, et ils considèrent qu'en général toutes les méthodes donnent la grandeur et la phase de l'harmonique fondamentale et que, dans le cas de mesures de puissance, les résultats demeurent exacts, pourvu que la tension du circuit soit pratiquement sinusoïdale.*

Avec l'électrodynamomètre on peut toujours mesurer exactement la puissance et obtenir, en nombre de cas, la valeur efficace d'une grandeur alternative de forme quelconque à l'aide de méthodes spéciales indiquées par les AA.

b) Choix parmi les différentes méthodes. — *Les AA. arrivent à conclure que, pour les fréquences supérieures à 500 périodes par seconde, la disposition avec induction mutuelle et téléphone est toujours à préferer, tandis qu'avec les fréquences industrielles le déphaseur à induction et l'électrodynamomètre donnent les meilleurs résultats.*

c) Enfin ils donnent une description de la disposition avec induction mutuelle qu'ils appliquent aux recherches sur les câbles téléphoniques; du potentiomètre Drysdale-Tinsley, et de l'installation du Laboratoire d'électrotechnique du Polytechnicum *de Milan. De cette dernière ils illustrent les principales applications: à la détermination générique de l'amplitude et de la phase de plusieurs grandeurs alternatives, à l'étalonnage des voltmètres et des wattmètres et à l'essai direct ou indirect des transformateurs de mesure.*

Digitized by Google

DISCUSSION

M. A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.) *remercie MM. Barbagelata et Emanueli pour leur intéressante étude et fait remarquer toute l'importance des méthodes d'opposition, non seulement dans le champ des essais des instruments de mesure pour courant alternatif, mais aussi dans celui de la téléphonie et de la télégraphie.*

M. C. O. MAILLOUX (New-York). *Je suis entré par curiosité, n'ayant rien à faire aujourd'hui dans ma section, mais je suis heureux de cette inspiration, car la communication de MM. Barbagelata et Emanueli, que je juge très importante, m'a intéressé vivement. Ce mémoire n'est pas seulement un résumé complet de ce qui a été fait en cette matière dans tous les pays (et j'ai vu avec plaisir qu'on a fait mention des récents travaux de notre illustre Président), mais elle nous offre aussi des renseignements très utiles et des propositions fort originales. L'importance des méthodes de zéro n'a besoin d'aucune mention; on doit toujours considérer, en effet, comme un grand progrès la substitution d'une méthode de zéro à une méthode directe. Je partage l'opinion des auteurs sur l'utilité d'abandonner les dispositions appliquées jusque maintenant pour les potentiomètres à courant continu. Je me rappelle à ce propos les mots de Lord Rayleigh, lorsque l'on commença à étudier les courants alternatifs: " Enfin nos étudiants devront apprendre quelque chose „, car il savait que la simple loi d'Ohm ne suffirait plus pour résoudre les problèmes relatifs aux circuits électriques.*

Principalement ce qui a été dit sur la mesure de la valeur efficace d'une onde déformée, m'a particulièrement intéressé.

M. H. ARMAGNAT (Paris). *En raison des difficultés d'une traduction instantanée, je n'ai pas pu suivre tout à fait M. Barbagelata, mais je crains que les inévitables variations de régime dans les circuits à courant alternatif, ne réduisent beaucoup la précision des méthodes d'opposition. Aussi pensé-je que c'est là le motif de leur emploi limité. Avec les courants continus la possibilité d'alimenter les différents circuits avec des accumulateurs, nous garantit une absolue constance du régime et permet cette extrême sensibilité, que nous connaissons bien: mais avec les courants alternatifs on ne peut pas espérer une pareille constance. De plus, je crains qu'il soit difficile d'obtenir des courants*

Digitized by Google

parfaitement sinusoïdaux, tels qu'il les faudrait pour les méthodes d'opposition, et que, même en ayant recours à des dispositions spéciales pour " filtrer „ l'onde déformée, on n'obtienne qu'une précision beaucoup plus faible qu'avec le courant continu.

M. A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). *Il va sans dire que la possibilité d'utiliser des accumulateurs est un avantage pour les mesures en courant continu: mais puisque, malheureusement, la pile à courant alternatif n'a pas encore été inventée, il faut se contenter des machines avec leurs inévitables variations. D'ailleurs la grande sensibilité qu'on peut obtenir avec certains types de galvanomètres à vibration, ou bien avec le galvanomètre Abraham, nous donnent quand même des résultats satisfaisants.*

M. R. O. HEINRICH (Berlin) *ne croit pas que les variations de régime puissent préoccuper; les auteurs pourront d'ailleurs donner des indications à ce sujet.*

M. A. BARBAGELATA (Milan). *Comme je viens de le dire, les variations de tension du générateur ne sont pas à craindre; elles ne troublent pas l'exécution des essais, car elles font varier proportionnellement les deux d. de p. à opposer. Plus redoutables sont les variations de fréquence, car elles troublent les relations de phase des différents d. de p. du circuit.*

Or, puisque, en général, les variations de tension sont simultanées avec celles de fréquence, il est sûr que l'approximation définitive des méthodes d'opposition que nous venons de décrire n'est pas aussi précise qu'avec les courants continus. Nous pensons pourtant qu'elle est largement suffisante dans la plupart des cas de la pratique, et qu'on peut obtenir, avec les méthodes décrites, des résultats auxquels l'on n'arriverait pas par d'autres méthodes.

Digitized by Google

Misura delle resistenze d'isolamento

in un

impianto a corrente alternativa durante l'esercizio.

Ing. Alberto Dina (Palermo)

Regia Scuola Ingegneri.

Premesse.

Negli impianti a corrente alternativa semplice o trifase, a punto neutro isolato, sono in uso sovente indicatori di terre, costituiti da voltmetri inseriti fra i diversi poli della sorgente di elettricità e la terra, i quali segnalano una terra franca in un conduttore mediante l'annullarsi della deviazione nell'istrumento corrispondente.

Ma sarebbe importante di sapere di più, cioè di ricavare, durante l'esercizio, dai valori delle letture a uno o più voltmetri opportuni i valori delle singole resistenze di isolamento. Il problema si presenta molto complesso, perchè le correnti verso terra, e quindi le tensioni, sono dovute non soltanto all'imperfetto isolamento, ma ben anche alle capacità delle fasi verso terra; tuttavia esso ha attratto recentemente l'attenzione di vari autori.

L'ing. Vallauri in uno studio analitico si occupa principalmente del caso particolare di un guasto in un'unica fase, supponendo a priori le altre illese e di resistenza d'isolamento nota; mediante le relazioni che stabilisce e misure che eseguisce con voltmetri elet-

Digitized by Google

trostatici determina la fase danneggiata e la resistenza del difetto (1).

Il prof. MAUDUIT, dopo una breve trattazione analitica, indica una costruzione geometrica semplice per determinare le tre resistenze di isolamento in un sistema trifase di capacità trascurabile (2). Pur troppo però quest'ipotesi è lecita soltanto per pochi impianti, sicchè la soluzione manca completamente di generalità. Inoltre egli ammette che il voltmetro adoperato presenti soltanto resistenza, non contemplando così l'uso degli istrumenti affetti da autoinduzione in misura sensibile.

In un recentissimo articolo l'ing. LEPRINCE-RINGUET (colla collaborazione dell'ing. LÉON) tratta il problema della determinazione degli isolamenti per impianti mono e trifasi, considerando l'influenza della capacità verso terra e supponendo che i voltmetri contengano resistenza ed autoinduzione (3); ma le sue soluzioni analitiche riescono oltremodo complicate, nè conducono ad alcuna interpretazione grafica.

In complesso, o per la diversità fra le condizioni supposte e le reali o per la complicazione dei metodi e dei risultati, le trattazioni suindicate non appaiono veramente rispondenti allo scopo pratico che esse si propongono.

Molti problemi relativi alle correnti alternative semplici e trifasi si possono risolvere mediante metodi pressochè spogli di calcoli matematici; e queste soluzioni prevalentemente grafiche, presentando spesso rispetto alle analitiche il vantaggio di essere più semplici e con maggiore evidenza connesse col lato fisico della questione, riescono in generale meglio accette agli elettrotecnici.

Per tali motivi ho voluto tentare la soluzione geometrica generale di svariati problemi relativi alla determinazione delle resistenze di isolamento, valendomi di considerazioni del tutto

---

(1) *Squilibri di potenziale verso terra in una rete di distribuzione elettrica*, Atti dell'Associazione Elettrotecnica Italiana, 1909, fasc. 6°. Nello stesso fascicolo fa cenno del problema anche l'ing. FANO nell'articolo: *Disposizioni contro i pericoli derivanti da contatti verso terra di conduttori ad alta tensione.*

(2) *Mesure de l'isolement des conducteurs d'un réseau triphasé en fonctionnement*, " La Revue électrique „, 30 octobre 1910.

(3) *La mise du point neutre à terre et le contrôle permanent des isolements dans un réseau à courant alternatif*, " La lumière électrique „, 1° e 8 aprile 1911.

Digitized by Google

diverse da quelle poste a base delle ricerche suaccennate; e in quanto segue riferisco i risultati a cui sono pervenuto (1).

Per maggiore chiarezza di esposizione richiamo innanzi tutto alcune proprietà, per quanto notissime, relative all'accoppiamento in serie oppure in parallelo di una resistenza e di una capacità, perchè ce ne dovremo valere sovente.

Connessione in serie. — Sia E il valore efficace della tensione di forma sinusoidale e di frequenza $\frac{\omega}{2\pi}$, agente agli estremi del gruppo formato dalla resistenza R e dalla capacità C in serie fra loro.

La E consta di due componenti in quadratura (fig. 1): della tensione IR ai capi della resistenza, in fase con I, e della tensione $\frac{I}{\omega C}$ ai morsetti del condensatore, in ritardo di 90° rispetto alla corrente.

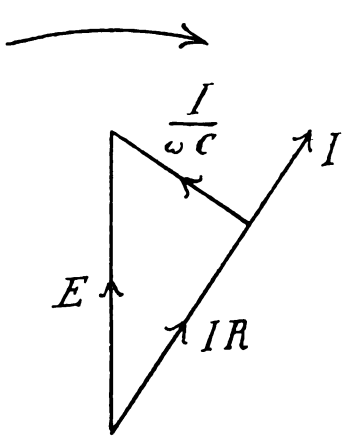


Fig. 1.

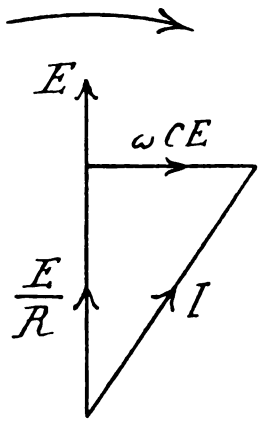


Fig. 2.

È facile dedurre le differenze di fase fra le varie grandezze; notiamo qui che l'angolo, di cui la tensione componente E_c agli estremi della capacità ritarda rispetto alla tensione totale, è:

$$\widehat{E, E_c} = \text{arc tg } \omega CR .$$

(1) Noto che non ho avuto occasione fin qui di adoperare praticamente i metodi di misura che verrò indicando. Ciò mi valga di scusa, se mi saranno sfuggite delle osservazioni, che l'esperimento avrebbe potuto suggerire.

Digitized by Google

Connessione in parallelo. — Sia E la tensione agente ai nodi del circuito formato dalla resistenza e dalla capacità in parallelo, I la corrente esterna. Questa è la risultante di due componenti in quadratura (fig. 2): della corrente $\frac{E}{R}$ attraverso alla resistenza, in fase colla tensione, e della corrente ωCE di carica del condensatore, in precessione di 90° rispetto ad E. Ne viene che l'angolo di cui la corrente esterna avanza rispetto alla tensione è:

$$\widehat{E,I} = \text{arc tg } \omega CR .$$

Determinazione delle resistenze di isolamento conoscendo le capacità.

Ammettiamo in questo capitolo di conoscere le capacità dei diversi poli verso terra; e, unicamente per semplicità di esposizione, riteniamo che esse abbiano il medesimo valore c. Questa ipotesi è in generale molto vicina alla realtà; ad ogni modo essa non è necessaria, perchè tutti i problemi di questo capitolo si possono risolvere con leggere varianti anche nel caso che le capacità siano disuguali. Sia C la capacità globale, cioè risultante dal parallelo delle singole capacità, e quindi uguale alla loro somma.

Supponiamo che nessun punto dell'impianto sia messo permanentemente a terra, e chiamiamo R_1, R_2..... le resistenze incognite di isolamento verso terra dei singoli poli; R la resistenza globale di isolamento, cioè risultante dal parallelo delle singole resistenze $\left(\text{è quindi } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots\right)$.

Sia le resistenze di isolamento che le capacità verso terra si riferiscono non solo alla conduttura, ma al complesso formato da questa e dagli avvolgimenti delle macchine o trasformatori su di essa inseriti.

Ammettiamo infine che le forze elettromotrici dei generatori abbiano andamento sinusoidale, e che soltanto ad esse siano dovute le tensioni delle fasi verso terra, escludendo cioè l'influenza perturbatrice di cariche statiche sulla linea o di altri fenomeni anormali.

a) *Misure con un voltmetro elettrostatico.* — Poichè i voltmetri elettrostatici in causa della loro esigua capacità non consumano

Digitized by Google

corrente apprezzabile (sicchè la loro inserzione non modifica le tensioni preesistenti verso terra), invece di inserire contemporaneamente un voltmetro per polo, si può inserire successivamente fra ciascun polo e la terra un unico istrumento; anzi così si attenua l'influenza di possibili inesattezze nelle scale. Ben inteso è necessario che la tensione concatenata resti costante durante le misure.

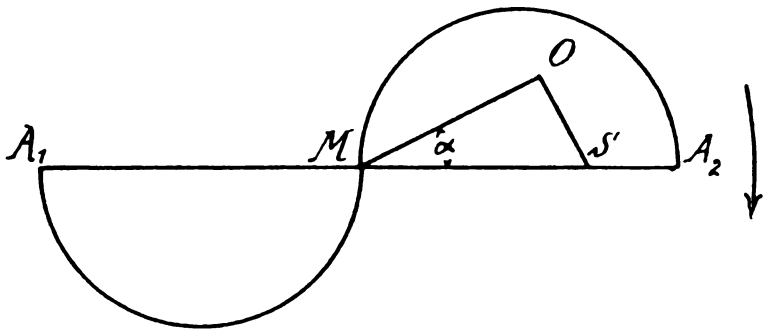


Fig. 3.

Sistema monofase. — I punti A_1 e A_2 (fig. 3) rappresentino topograficamente i potenziali dei due poli rispetto al punto O, rappresentante il punto di potenziale zero (punto neutro o centro del diagramma); e cioè la distanza $A_1 A_2$ misuri la tensione concatenata, e le distanze $A_1 O$ ed $A_2 O$ le tensioni verso terra, a seconda delle letture fatte al voltmetro (1).

Immaginiamo il sistema dato decomposto in due sistemi fittizi, l'uno contenente soltanto le capacità, l'altro solo le resistenze. Del primo di questi, essendo le due capacità in serie rispetto alla tensione concatenata ed uguali fra loro, il punto neutro coincide nel diagramma col punto di mezzo M del segmento $A_1 A_2$. Pel secondo sistema, dove le resistenze R_1 ed R_2, in generale disuguali, sono pure in serie rispetto alla tensione concatenata, il punto neutro è rappresentato da un punto S di $A_1 A_2$ (di posizione per ora ignota) tale che:

$$A_1 S : A_2 S = R_1 : R_2.$$

(1) A questa condizione soddisfano due punti O ed O_1 simmetrici rispetto ad $A_1 A_2$; è indifferente scegliere l'uno o l'altro; però, come vedremo, tale scelta individua il senso in cui si contano gli angoli positivi.

Digitized by Google

Il punto S coincide quindi col punto di applicazione della risultante di due forze parallele uguali alle conduttibilità $\frac{1}{R_1}$ e $\frac{1}{R_2}$ applicate rispettivamente in A_1 e A_2. Di questa osservazione ci varremo nella soluzione di altri problemi.

Dai due sistemi fittizi coi punti neutri M ed S possiamo ritornare al sistema realmente esistente di punto neutro O, immaginando che su ciascuna capacità del primo sistema agisca una tensione addizionale uguale ad M O, e su ciascuna resistenza del secondo agisca una tensione addizionale uguale ad S O, perchè:

$$A_1O = A_1M \dot{+} MO \qquad \text{e} \qquad A_2O = A_2M \dot{+} MO,$$

come pure

$$A_1O = A_1S \dot{+} SO \qquad \text{e} \qquad A_2O = A_2S \dot{+} SO.$$

Ciò posto, poichè tanto la somma dei valori momentanei delle correnti verso terra nel sistema dato, come pure l'analoga somma nel complesso dei due sistemi fittizi componenti è uguale a zero, lo stesso dovrà avvenire per la differenza fra l'una e l'altra, cioè per la somma dei valori momentanei delle correnti generate dalle tensioni M O ed S O.

Nei riguardi del punto neutro O possiamo quindi immaginare le capacità concentrate in parallelo nel punto M e le resistenze (oppure le conduttibilità) di isolamento concentrate in parallelo nel punto S.

La somma delle correnti dovute alla tensione S O nel sistema delle resistenze, scorrendo in ugual senso nel sistema delle capacità, darebbe luogo ad una caduta di tensione $OM = -MO$; sicchè la S M, somma geometrica di S O e di O M, ci appare come la tensione effettiva E, capace di generare il valore effettivo I di questa somma di correnti nel gruppo formato dalla resistenza globale di isolamento e dalla capacità globale in serie fra di loro (1).

Noi ci troviamo quindi nel caso considerato nella figura 1 delle premesse. Il triangolo S O M deve essere rettangolo in O; epperò

(1) È indifferente di attribuire alla tensione E il senso da S ad M o da M ad S, purchè si fissi in modo conseguente il senso degli altri vettori.

Digitized by Google

la posizione del punto S (e di conseguenza il rapporto fra le conduttibilità $\frac{1}{R_1}$ e $\frac{1}{R_2}$) si ricava immediatamente dalle posizioni note dei punti M ed O. Inoltre chiamando α l'angolo $S\widehat{M}O$, di cui la tensione componente O M ritarda rispetto alla tensione totale S M, e $\gamma = \frac{1}{\omega C}$ la resistenza apparente dovuta alla capacità globale, risulta:

$$\frac{OS}{OM} = \operatorname{tg} \alpha = \omega CR = \frac{R}{\gamma}.$$

Mediante quest'uguaglianza si può calcolare la conduttibilità globale $\frac{1}{R}$, o trovarne geometricamente il valore come quarta proporzionale dopo O S, O M e $\frac{1}{\gamma} = \omega C$. Delle conduttibilità

$$\frac{1}{R_1} \text{ e } \frac{1}{R_2}$$

si conosce quindi la somma ed il rapporto; sicchè con tutta facilità se ne può determinare aritmeticamente o geometricamente il valore.

Poichè per una data posizione di S il punto O deve trovarsi sulla semicirconferenza descritta su M S nel senso degli angoli di ritardo, e le posizioni limiti di S sono costituite dai punti A_1 e A_2 (resistenza di isolamento in un polo uguale a zero), possiamo asserire *a priori*, senza conoscere alcun dato dell'impianto, che il punto O non può cadere fuori del perimetro limite formato dal segmento $A_1 A_2$ e dalle semicirconferenze aventi rispettivamente per diametro $M A_1$ e $M A_2$, segnate nella figura 3 in corrispondenza al verso scelto per contare gli angoli positivi. Ciò, ben s'intende, se il sistema di centro O consta soltanto di resistenza e di capacità; le deduzioni non varrebbero più se un difetto contenesse anche autoinduzione (noi stessi ne introdurremo di simili in alcune misure).

Dei due punti A_1 ed A_2 il più vicino ad O è anche il più prossimo ad S; ne viene che dei due poli quello, a cui corrisponde la tensione più bassa verso terra, presenta altresì la minore resistenza d'isolamento.

Poichè, a tenore dell'equazione precedente, la resistenza apparente γ dovuta alla capacità e la resistenza R di isolamento

Digitized by Google

sono rispettivamente proporzionali ai segmenti OM ed OS, la costruzione indicata porta alle seguenti considerazioni:

Se γ è grande rispetto ad R (come può avvenire in impianti a bassa tensione), il punto O cade vicino ad S. Al limite, cioè quando le correnti di capacità sono del tutto trascurabili rispetto a quelle di isolamento, O coincide con S, ed in tal caso è ancora determinabile il rapporto delle resistenze, ma non più il loro valore assoluto.

Se invece γ è piccolo rispetto ad R, come può succedere in reti di isolamento elevato (per esempio ad alta tensione) o di capacità notevole (per esempio contenenti cavi), il punto O cade vicino ad M ed inoltre l'angolo α è prossimo ad un angolo retto. Ne viene che la direzione OS (da determinarsi rispetto al segmento brevissimo MO) può riuscire inesatta, e che ad ogni modo questa retta incontra la $A_1 A_2$ sotto un angolo prossimo a 180°, sicchè la posizione trovata pel punto S può mancare di precisione.

Al limite il punto O coincide col punto M; ed allora il punto S non è determinabile. L'uguaglianza delle letture al voltmetro può adunque corrispondere non soltanto alla simmetria dell'impianto sia riguardo alle capacità che alle resistenze di isolamento, ma ben anche al caso che, data la simmetria della capacità, le correnti corrispondenti mascherino quelle di dispersione. E cioè in tal caso il metodo è poco sensibile, venendo avvertiti soltanto difetti di una certa entità.

In altre parole, se consideriamo un impianto che si trovi in simili condizioni, uno spostamento del punto neutro del sistema può venire causato soltanto da una diminuzione notevole della resistenza globale di isolamento, tale da variare in modo sensibile l'ordine di grandezza del rapporto di R a γ.

Inoltre per un dato valore della resistenza globale il punto neutro si allontana tanto più da M (in linea retta, rimanendo l'angolo α costante) quanto più le resistenze sono diverse fra loro; epperò un unico difetto porterà maggiore squilibrio nelle tensioni e sarà quindi più facilmente avvertibile di due difetti in poli diversi, di pari resistenza globale. Se un solo conduttore presenta un difetto di isolamento, il perturbamento corrispondente nell'impianto, salvo lo squilibrio delle tensioni verso terra, è in generale così piccolo da passare inosservato. Se invece entrambi sono avariati, il richiamo di corrente dovuto ai difetti, che risultano in serie rispetto alla tensione concatenata, può essere notevole, dando luogo persino ad un corto circuito.

Digitized by Google

Epperò in impianti in cui normalmente le correnti di capacità siano notevolmente superiori a quelle di dispersione, ad uno spostamento del punto neutro in causa di difetti in due poli potrà spesso seguire a breve distanza di tempo lo scatto degli automatici.

E se consideriamo due impianti in cui le correnti di capacità siano preponderanti, costituiti analogamente (cioè con pari capacità e pari resistenza di isolamento chilometrica), ma di diversa estensione, difetti di uguale entità assoluta si renderanno più facilmente sensibili collo squilibrio delle tensioni nell'impianto di capacità e quindi di estensione minore.

Notiamo infine che la scala dei voltmetri elettrostatici, come in generale dei voltmetri a corrente alternativa, incominciando o riuscendo in generale leggibile esattamente solo a una distanza abbastanza notevole dallo zero, può portare anche dal canto suo limitazioni all'esecuzione delle misure.

Se le capacità dei due poli verso terra sono diverse tra di loro, vale ancora la costruzione indicata, purchè al punto M si sostituisca un punto N, che divida il segmento $A_1 A_2$ in ragione inversa delle singole capacità.

Sistema trifase. — Ammessa la simmetria nei carichi, i punti rappresentanti i potenziali delle tre fasi sono i vertici di un triangolo equilatero $A_1 A_2 A_3$. Poichè la posizione del punto neutro può venire determinata rispetto a questo triangolo mediante i valori delle tensioni verso terra di due fasi, due sole sono le variabili indipendenti ed altrettante sono quindi le incognite che possiamo determinare.

Supponiamo dapprima di conoscere, oltre alla capacità, la resistenza globale (Di solito questa grandezza non sarà nota *a priori*; ma la considerazione di questa ipotesi tornerà utile per la soluzione di altri problemi). Restano così da determinare soltanto due resistenze di isolamento, venendo la terza dedotta immediatamente.

Ottenuta mediante le letture al voltmetro la posizione del punto neutro O nel diagramma, immaginiamo decomposto il sistema dato in due, l'uno contenente le capacità ed avente per punto neutro il baricentro M del triangolo $A_1 A_2 A_3$, l'altro costituito dalle resistenze ed avente per punto neutro un punto S da determinarsi (fig. 4).

Con ragionamento analogo a quello usato nella soluzione del

Digitized by Google

problema precedente si deduce che il triangolo M O S è rettangolo in O e che ha l'angolo

$$O\hat{M}S = \text{arc tg } \omega CR$$

in ritardo rispetto MS, sicchè esso è facilmente costruibile.

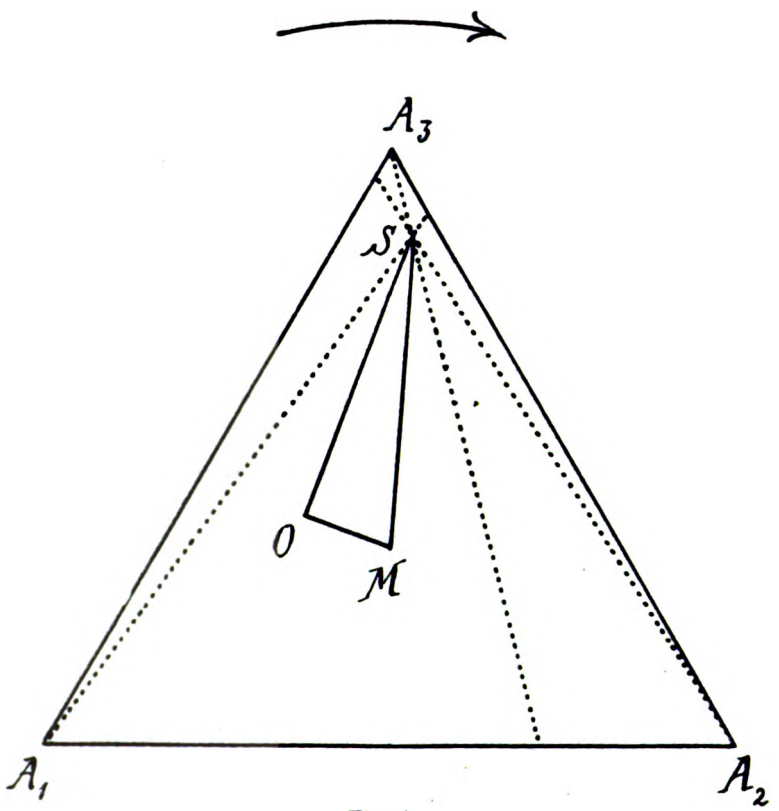


Fig. 4.

Possiamo allora ottenere i rapporti fra le singole resistenze di isolamento, valendoci di un'osservazione analoga a quella già fatta in occasione del sistema monofase; e cioè, che in un sistema trifase composto di resistenze, il punto neutro coincide col punto di applicazione della risultante di forze parallele, applicate ai vertici del triangolo delle tensioni concatenate ed

Digitized by Google

uguali alle rispettive conduttibilità (1). Ciascuna congiungente il punto S con un vertice del triangolo divide quindi il lato opposto in ragione inversa delle conduttibilità, o, ciò che torna lo stesso, in ragione diretta delle resistenze di isolamento delle fasi corrispondenti agli estremi del lato.

Delle tre conduttibilità si conoscono quindi i rapporti e la somma, sicchè esse riescono facilmente determinabili.

Si noti che soltanto dalla posizione del punto O (cioè dai valori delle tensioni verso terra) per un sistema trifase non si può in generale dedurre nemmeno una graduazione delle resistenze di isolamento delle diverse fasi. Ad esempio, nella figura 4 dalla posizione del punto S risulta che la fase meglio isolata è la 1, mentre invece la sua tensione verso terra è la minima, e che la fase più avariata è la 3, la cui tensione verso terra è intermedia fra quelle delle altre due.

Tuttavia qualche informazione superficiale si può ricavare anche dalla sola posizione di O, prescindendo da ogni altro dato dell'impianto; ad esempio in molti casi si potrà dire senz'altro quale delle tre fasi sia la più guasta. Se N, P, Q sono i punti di mezzo dei lati del triangolo, e se supponiamo che la fase 1 sia la peggio isolata, il punto S dovrà cadere entro il quadrilatero A_1 N M Q (fig. 5). In corrispondenza il punto O (che si deve trovare sulla semicirconferenza descritta su MS come diametro dalla parte opposta al senso di rotazione dei vettori) dovrà cadere entro la figura mistilinea limitata dai segmenti A_1 Q e QM, dal tratto A_1 N della semicirconferenza avente A_1 M per diametro, e dalla semicirconferenza descritta su MN come diametro. Se consideriamo l'analoga figura, corrispondente invece all'ipotesi che sia la fase 2 la più avariata, vediamo che essa ha in comune colla precedente l'area del semicerchio di diametro MN. Si può quindi concludere che, se il punto O cade nell'area (interna o esterna al triangolo A_1 A_2 A_3) lasciata in bianco nella figura, la fase più avariata è quella corrispondente

---

(1) La dimostrazione generale di questa proprietà, dedotta qui soltanto per analogia, credo sia stata data per la prima volta da Kennelly. Essa vale non solo per resistenze ohmiche, ma anche per resistenze apparenti di ugual natura, ad esempio dovute tutte a capacità; epperò sarà facile costruire il punto neutro del sistema formato dalle sole capacità, anche quando esse non siano eguali fra loro.

Digitized by Google

al vertice più vicino, e che presenta quindi la tensione minima verso terra; che se invece O cade in uno dei semicerchi tratteggiati, la fase più avariata può essere o la suaccennata o quella che la precede nel senso di rotazione dei vettori.

Notiamo anche che, qualunque siano le capacità e le resistenze di isolamento del sistema, pel senso prescelto di rotazione dei vettori il punto O non può cadere fuori del perimetro

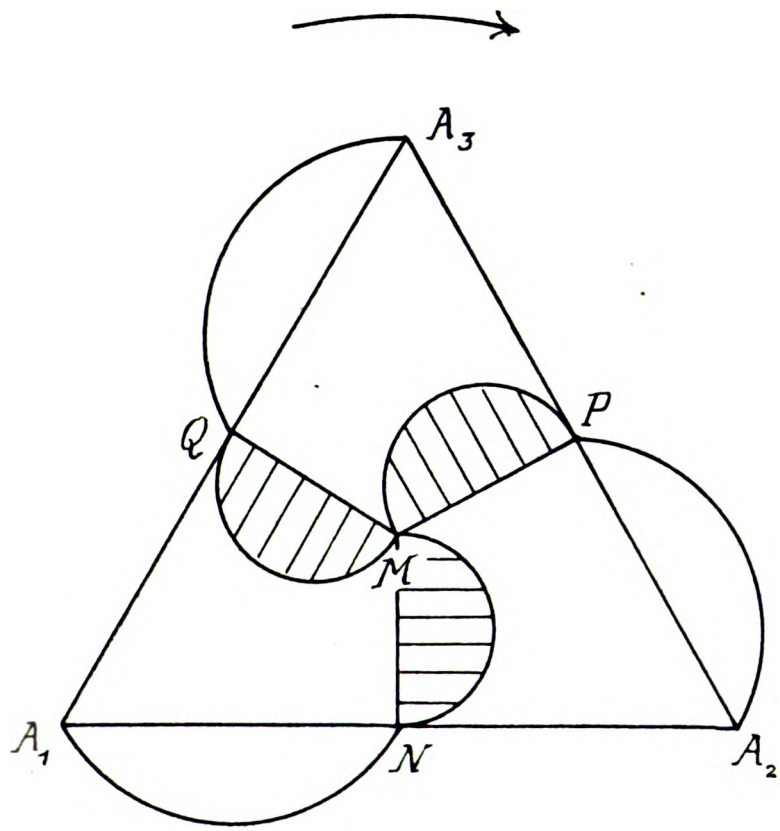


Fig. 5.

mistilineo esterno segnato nella figura 5. Di questa osservazione ci potremo talvolta valere, quando si conoscano i valori delle tensioni verso terra di due fasi soltanto, per scartare una delle posizioni geometricamente possibili pel punto neutro. Pel caso però di un difetto contenente anche autoinduzione, queste de-

Digitized by Google

duzioni non valgono più, analogamente a quanto abbiamo visto pel sistema monofase.

Si possono fare altre ipotesi che riducano a due il numero delle incognite, ad es., che la fase 3 sia illesa ed abbia quindi una resistenza di isolamento uguale alla resistenza normale R_0, supposta nota. In tal caso il problema si risolve facilmente considerando la decomposizione del sistema in due sistemi fittizi: l'uno costituito in ognuna delle tre fasi da una capacità c e da una resistenza uguale ad R_0, ed avente quindi a cagion di simmetria il punto M per punto neutro; l'altro costituito dalle resistenze dei difetti (cioè da due resistenze tali, che, combinate in parallelo con R_0, diano luogo alle resistenze R_1 ed R_2) in serie rispetto alla tensione $A_1 A_2$, sistema avente quindi per punto neutro un opportuno punto Z del lato $A_1 A_2$. L'angolo $\widehat{MOZ}$ risulta uguale a

$$\beta = 180^0 - \text{arc tg } \omega C \frac{R_0}{3} = 180^0 - \text{arc tg } \omega c R_0 .$$

Ma non vale la pena di insistere su simili problemi basati su ipotesi arbitrarie, tanto più che indicheremo più avanti dei metodi, che permettono di trovare tutte e tre le resistenze.

b) *Misure con un voltmetro che consuma corrente.* — Se, invece di voltmetri elettrostatici, adoperiamo voltmetri contenenti resistenza sola, oppure resistenza ed autoinduzione, voltmetri cioè che consumano corrente, non è più indifferente inserirne contemporaneamente altrettanti quanti sono i poli, oppure inserirne successivamente uno solo fra ciascun polo e la terra.

Nel primo caso si ottiene un punto neutro diverso dal preesistente in causa dei difetti introdotti, rappresentati dai voltmetri, ma il numero di letture indipendenti, e quindi di incognite che si possono determinare, è lo stesso come per l'uso dei voltmetri elettrostatici.

Nel secondo caso invece le cose si presentano sotto un altro aspetto, inquantochè all'inserzione del voltmetro fra i diversi poli e la terra corrisponde ogni volta un nuovo punto neutro. E noi vedremo che in tal modo si può risolvere il problema, rimasto insoluto fin qui, della determinazione di tutte e tre le resistenze di isolamento in un sistema trifase.

Il voltmetro inserito tra un polo e la terra costituisce un difetto di isolamento, e la corrente che l'attraversa si deve chiu-

Digitized by Google

dere attraverso tutte le altre resistenze di isolamento e tutte le capacità relative allo stesso ed ai rimanenti poli, cioè attraverso un sistema che rimane costante qualunque sia il polo a cui è attaccato il voltmetro. L'intensità di questa corrente voltmetrica può quindi venire espressa in ogni caso così mediante il rapporto fra la tensione ai morsetti del voltmetro e l'impedenza di questo, come mediante il rapporto fra la tensione preesistente verso terra e l'impedenza del gruppo, formato dal voltmetro in serie col sistema considerato. Ne consegue la proprietà generale che i rapporti tra ogni lettura al voltmetro e la rispettiva tensione preesistente verso terra sono uguali fra loro.

Nel sistema delle resistenze d'isolamento e delle capacità, si trascura l'influenza della resistenza e dell'autoinduzione delle rimanenti parti del circuito (il che è solitamente lecito senza errore notevole), o meglio si ritiene conglobato opportunamente il loro effetto rispettivamente nei valori della resistenza di isolamento e della capacità.

Quali costanti atte a caratterizzare il voltmetro si possono scegliere la sua resistenza ϱ e il suo coefficiente di autoinduzione L, oppure la resistenza ϱ e l'angolo φ, di cui la corrente che l'attraversa ritarda rispetto alla tensione ai morsetti (1).

Sistema trifase. — Mediante le tre successive letture al voltmetro è facile, in base alle considerazioni precedenti, di ottenere per un sistema trifase la posizione del punto neutro preesistente O. Esso deve difatti giacere su tre luoghi geometrici: sul luogo geometrico dei punti le cui distanze da A_1 e A_2 stanno fra loro come le letture corrispondenti (costituito dalla circonferenza avente un diametro limitato dai punti che dividono il lato A_1A_2 internamente ed esternamente nel rapporto delle letture), come pure su due analoghi luoghi geometrici. Per la determinazione di O basteranno due di tali circonferenze, quando, cadendo una delle loro due intersezioni fuori del perimetro limite, non vi sia incertezza nella scelta.

(1) La trattazione attuale comprende anche il caso, in cui la misura si effettui coll'intermediario di un trasformatore; e cioè il voltmetro (che può essere allora di natura qualunque, anche statico) è connesso al secondario di un trasformatore, il cui primario viene inserito successivamente fra ciascun polo e la terra. Per tale variante ϱ, L e φ rappresentano non già le costanti dell'istrumento propriamente detto, sibbene quelle relative al gruppo impiegato per la misura.

Digitized by Google

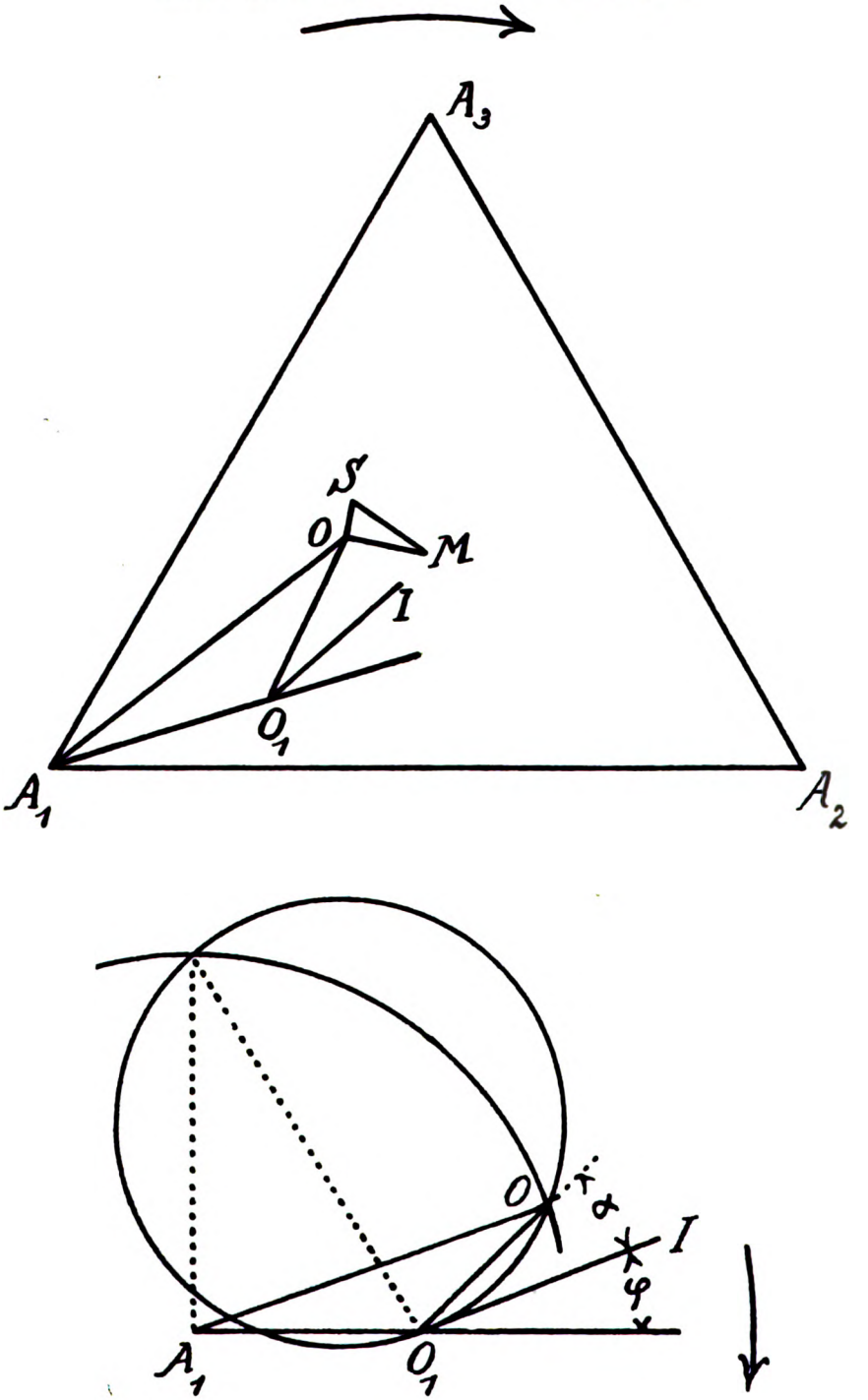


Fig. 6.

Digitized by Google

Sia O_1 (fig. 6) la posizione del punto neutro del sistema risultante dal sistema dato di punto neutro O e dal difetto costituito dal voltmetro applicato in A_1 (di O_1 si conosce finora soltanto la distanza da A_1, uguale alla lettura corrispondente). Il passaggio dai sistemi componenti al sistema risultante si può immaginare dovuto alle tensioni addizionali OO_1 e A_1O_1, agenti rispettivamente sui due sistemi e tali da provocare due correnti di ugual valore I che si neutralizzano reciprocamente.

Poichè questa corrente attraversa il voltmetro, essa riesce uguale a:

$$I = \frac{A_1O_1}{\sqrt{\varrho^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{A_1O_1 \cos \varphi}{\varrho}$$

ed è ritardata dall'angolo φ rispetto ad $A_1 O_1$. La stessa corrente, attraversando nel medesimo senso il sistema di capacità globale C e di resistenza globale di isolamento R in parallelo fra loro, dà luogo a una tensione $O_1O = -OO_1$; sicchè la tensione preesistente A_1O, somma geometrica di A_1O_1 e O_1O, ci appare come la tensione capace di generare la corrente I nel gruppo formato dal voltmetro in serie col sistema di R e C in parallelo fra loro, proprietà questa già accennata nelle considerazioni generali.

Sia α l'angolo di cui la corrente avanza rispetto ad O_1O, che, a tenore del diagramma della fig. 2, è uguale ad arc tg ωCR. La componente di carica della capacità, in avanzo di 90° rispetto alla stessa tensione, ha il valore

$$I \operatorname{sen} \alpha = O_1O . \omega C .$$

Eliminando I fra questa equazione e la precedente risulta

$$\frac{A_1O_1 \cos \varphi}{\omega C \varrho} \operatorname{sen} \alpha = O_1O.$$

Mediante questa relazione è facile costruire un triangolo uguale al triangolo A_1O_1O, determinando contemporaneamente l'angolo α. Tracciato in posizione qualunque un segmento uguale ad A_1O_1 ed una retta O_1I ritardata di φ rispetto ad esso, si descriva la circonferenza di diametro

$$\frac{A_1O_1 \cos \varphi}{\omega C \varrho},$$

tangente ad O_1I in O_1 dalla parte degli angoli di ritardo.

Digitized by Google

Poichè una corda inclinata di α rispetto alla tangente risulta uguale al diametro moltiplicato per sen α, l'intersezione della circonferenza descritta con un'altra di raggio uguale ad A_1O determina il terzo vertice di un triangolo, che, in posizione diversa, riesce uguale al triangolo A_1O_1O.

Dal valore dell'angolo $\widehat{IO_1O} = \alpha = \text{arc tg } \omega CR$ si ricava la resistenza globale R; e, per trovare le singole resistenze di isolamento, basta osservare che, chiamato al solito S il punto neutro del sistema formato da queste resistenze soltanto, anche l'angolo OMS riesce eguale ad α, sicchè il triangolo rettangolo MOS è immediatamente costruibile; dopodichè la soluzione del problema si completa nel modo noto.

Poichè le circonferenze, che servono alla determinazione del triangolo A_1O_1O, si tagliano in due punti, si hanno in generale due soluzioni; è dunque possibile che ai dati del problema, cioè alle tre letture al voltmetro, oltre alla terna di resistenze di isolamento realmente esistente, soddisfi pure un'altra terna di resistenze.

La seconda soluzione geometricamente possibile potrà però spesso venire scartata senz'altro in base a vari criteri fisici: ad es. se l'angolo $\widehat{IO_1O} = \alpha$ riuscisse maggiore di 90° (come avviene nella figura per la soluzione in punteggiato), o se il punto S cadesse fuori del triangolo $A_1A_2A_3$. Se il cos φ del voltmetro è uguale ad 1, il punto O_1 e gli analoghi punti O_2 ed O_3 (che si ottengono costruendo i triangoli A_2OO_2 e A_3OO_3 simili al triangolo A_1OO_1) devono cadere entro il perimetro limite, di cui abbiamo tenuto precedentemente parola. Infine, lo stesso ordine di grandezza dei valori trovati per R può servire di criterio nella scelta, potendosi scartare quello, che riuscisse superiore alla resistenza normale di isolamento.

Quando le correnti di capacità siano molto superiori a quelle di dispersione, il punto O cade, come sappiamo, vicinissimo ad M, o, al limite, coincide con esso, sicchè la costruzione di S riesce inesatta od impossibile. Nell'ipotesi fatta, riuscendo l'angolo α pressochè retto, un lieve errore nella sua determinazione potrà influire sensibilmente sulla determinazione della resistenza globale, che dipende da tg α. Per costruire il triangolo A_1O_1O e ricavarne l'angolo α il più esattamente possibile, converrà scegliere opportunamente il voltmetro, in modo che il punto O_1 riesca notevolmente spostato da O. Però già un valore approssimato della resistenza globale può costituire spesso un risultato

Digitized by Google

utile, perchè nessuna delle singole resistenze di isolamento può riuscire inferiore ad essa.

La scelta del voltmetro è in ogni caso importantissima, non solo per l'esattezza, ma ben anche per la possibilità delle misure. Se indichiamo con

$$Y_r = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C)^2}}$$

l'impedenza complessiva della rete dovuta alle capacità ed alle resistenze di isolamento in parallelo fra loro, e con Y_v l'impedenza del voltmetro, poichè ad esse sono proporzionali le tensioni relative O_1O e A_1O_1 si ha:

$$Y_r = Y_v \frac{O_1O}{A_1O_1} .$$

Ma in un voltmetro per corrente alternativa la graduazione esatta incomincia solitamente a circa $^1/_4$ o $^1/_5$ del limite massimo della scala; epperò, affinchè la misura sia possibile, A_1O_1 non può discendere al disotto di una data grandezza, nè di conseguenza O_1O (differenza geometrica fra la tensione preesistente A_1O e A_1O_1) essere maggiore di un certo valore. In corrispondenza quindi al valore massimo realizzabile pel prodotto del rapporto $\frac{O_1O}{A_1O_1}$ per l'impedenza del voltmetro, vi sarà un valore massimo per l'impedenza complessiva della rete, misurabile con un dato istrumento. Questo dovrà quindi avere una sensibilità ed un'impedenza opportune, in relazione all'entità delle grandezze da misurare.

Sistema monofase. — Poichè pel sistema monofase il problema è già stato completamente risolto mediante l'uso di un voltmetro elettrostatico, ci accontenteremo, per l'impiego di un voltmetro che consuma corrente, di indicare le soluzioni relative ai seguenti due casi particolari, in cui esse risultano assai semplici:

1° Il voltmetro è qualunque, ma è accessibile il punto di mezzo dell'avvolgimento di una macchina o di un trasformatore inserito sulla rete.

Digitized by Google

2° Il $\cos\varphi$ del voltmetro è uguale ad uno (ad es. voltmetro termico).

Nel primo caso, lette le tre tensioni verso terra quando un morsetto del voltmetro è attaccato rispettivamente all'uno o all'altro dei due poli o al punto di mezzo dell'avvolgimento, si determina il punto neutro O del sistema in modo simile a quello usato pel sistema trifase, cioè come intersezione di due circonferenze; ad es. del luogo geometrico dei punti le cui distanze da A_1 ed A_2 stanno nel rapporto delle rispettive letture al voltmetro e dell'analogo luogo geometrico per le distanze da A_1 ed M. La soluzione si completa come per l'uso di un voltmetro elettrostatico.

Nel secondo caso ($\cos\varphi = 1$), supponendo il problema risolto, sia S (fig. 7) il punto neutro del sistema formato dalle resistenze R_1 ed R_2 soltanto; S_1 ed S_2 i punti neutri dei sistemi formati da queste resistenze ed in più dalla resistenza ϱ del voltmetro, inserito fra la terra e rispettivamente A_1 od A_2.

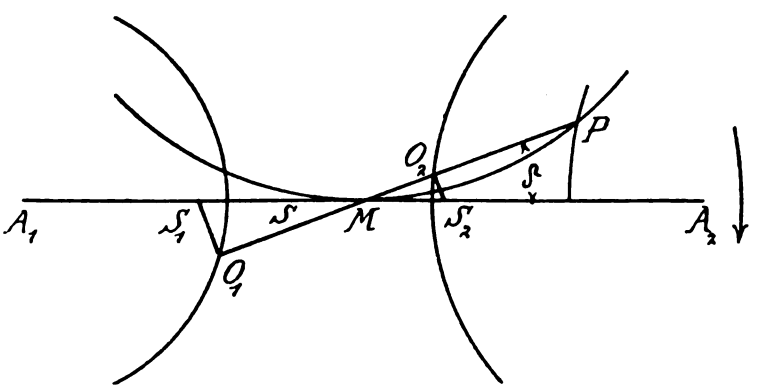


Fig. 7.

Per l'osservazione già fatta che le conduttibilità si compongono come forze parallele, ad es. perpendicolari ad A_1A_2, dall'uguaglianza dei momenti delle componenti e della risultante presi rispetto ad S possiamo dedurre che:

$$SS_1 : SA_1 = SS_2 : SA_2 = \frac{1}{\varrho} : \frac{1}{R} + \frac{1}{\varrho}$$

da cui anche:

$$SS_1 + SS_2 : SA_1 + SA_2 = \frac{1}{\varrho} : \frac{1}{R} + \frac{1}{\varrho}$$

Digitized by Google

cioè:

$$S_1S_2 = A_1A_2 \frac{\frac{1}{\varrho}}{\frac{1}{R}+\frac{1}{\varrho}}.$$

Considerando anche la capacità globale applicata in M, si ottengono i punti neutri O_1 ed O_2 dei sistemi risultanti dal sistema dato ed in più dal voltmetro attaccato rispettivamente ad A_1 od A_2. I triangoli MO_1S_1, MO_2S_2 sono rettangoli in O_1 ed O_2 ed hanno gli angoli in M uguali fra loro (sicchè i tre punti M, O_1 e O_2 sono in linea retta) ed uguali a

$$\delta = \text{arc tg } \omega C \frac{1}{\frac{1}{R}+\frac{1}{\varrho}}.$$

Sostituendo nell'equazione che dà S_1S_2 a $\frac{1}{R}+\frac{1}{\varrho}$ il valore $\frac{\omega C}{\text{tg } \delta}$ ricavato dall'ultima uguaglianza, risulta:

$$S_1S_2 = \frac{A_1A_2}{\omega C \varrho} \text{ tg } \delta$$

e quindi:

$$O_1O_2 = S_1S_2 \cos \delta = \frac{A_1A_2}{\omega C \varrho} \text{ sen } \delta.$$

E poichè i punti O_1 ed O_2 devono trovarsi sulle circonferenze aventi per centri A_1 ed A_2 e per raggi le rispettive letture fatte ai voltmetri, questa relazione ci permette di determinarne la posizione.

A tal fine si descriva una terza circonferenza di diametro $\frac{A_1A_2}{\omega C \varrho}$ tangente in M ad A_1A_2, e per punti si disegni la curva, di cui ogni raggio vettore uscente da M è uguale al corrispondente segmento intercetto fra le circonferenze di centri A_1 ed A_2: il loro punto di intersezione P unito con M ci fornisce la retta richiesta O_1O_2.

Una volta descritta la terza circonferenza ausiliare, si vedrà subito ad occhio dove press'a poco avverrà il suo incontro colla curva da tracciarsi per punti; sicchè di questa (che ad ogni modo si costruisce assai semplicemente) basteranno pochissimi punti.

Digitized by Google

Trovata la O_1O_2 e quindi i punti S_1 ed S_2, si ottiene la conduttibilità globale da una delle relazioni suindicate:

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{\varrho} = \frac{\omega C}{tg\,\delta} = \frac{A_1A_2}{\varrho \cdot S_1S_2}$$

e, dalla posizione di S_1 od S_2 sulla A_1A_2, il rapporto

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{\varrho} : \frac{1}{R_2}$$

oppure l'altro

$$\frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} + \frac{1}{\varrho},$$

sicchè si deducono facilmente i valori delle due conduttibilità incognite. Per quanto di interesse secondario, si può pure trovare il punto O e le tensioni preesistenti.

Determinazione delle resistenze di isolamento e delle capacità.

I metodi precedenti di misura delle resistenze di isolamento, nel mentre hanno il vantaggio di essere fondati sull'uso di un unico voltmetro, hanno lo svantaggio di richiedere la conoscenza delle capacità verso terra.

Che se una misura preventiva di capacità non è stata fatta a tempo opportuno, o se l'impianto è stato successivamente modificato, sarebbe necessario di poter trovare i valori delle resistenze, prescindendo da quelli delle capacità, oppure, ed ancor meglio, di trovar contemporaneamente gli uni e gli altri. Si avrebbe così il vantaggio che i valori delle capacità verrebbero dedotti in condizioni del tutto uguali a quelle dei problemi precedenti, e potrebbero quindi venire usati poi con maggior fiducia di esattezza nell'applicazione di quelle soluzioni.

Ci proponiamo appunto di esporre in questo capitolo alcuni metodi per raggiungere lo scopo indicato. Naturalmente, essendo aumentato il numero delle incognite, deve aumentare in corrispondenza il numero delle osservazioni indipendenti.

Digitized by Google

Pel sistema monofase mediante quattro di tali misure si possono trovare le due resistenze e le due capacità; pel sistema trifase, per non complicar troppo la questione, ci accontenteremo di determinare le tre resistenze e le capacità nella ipotesi restrittiva che queste ultime siano uguali fra loro, sicchè occorreranno pure quattro misure indipendenti. Potrà però essere talvolta opportuno un numero maggiore di letture (per quanto non più indipendenti), allo scopo di semplificare la costruzione, od anche quando, ammettendo il problema in base alle quattro misure fatte più di una soluzione, si voglia eliminare o diminuire l'incertezza relativa alla scelta di quella che corrisponde effettivamente alla realtà (1).

Quale istrumentario può servire un voltmetro elettrostatico ed una resistenza, oppure un voltmetro elettrostatico ed uno che consuma corrente, oppure infine due voltmetri che consumano corrente.

Delle difficoltà, che si possono presentare nelle misure, inerenti alla grandezza relativa di R ed $\frac{1}{\omega C}$ od alle proprietà dei voltmetri, abbiamo già fatto cenno in problemi precedenti, sicchè ci esimeremo in appresso da simili discussioni.

a) *Misure con un voltmetro elettrostatico ed una resistenza ausiliare oppure con due voltmetri di cui uno elettrostatico.* — Considereremo il caso più generale che il secondo voltmetro contenga resistenza ed autoinduzione. Nella variante con una resistenza ausiliare, questa può venire intesa in senso largo come una combinazioue qualunque, che dia passaggio ad una corrente alternativa sfasata rispetto alla tensione agli estremi di un angolo φ; però ci riferiremo di preferenza al caso semplice di una resistenza ohmica ($\varphi = 0$).

Sia che si tratti di un sistema monofase o di uno trifase, si determini mediante due letture al voltmetro elettrostatico la posizione del punto neutro O; quindi, inserendo il voltmetro che consuma corrente fra un polo, per es. 1, e la terra, e con-

(1) Soluzioni multiple corrispondono analiticamente alla dipendenza del problema da un sistema di equazioni, di cui taluna è di grado superiore al primo.

Digitized by Google

temporaneamente l'elettrostatico fra un altro polo e la terra, si determini la posizione del nuovo punto neutro O_1. Se pel sistema trifase vi fosse incertezza nella scelta fra le due posizioni geometricamente possibili per ciascun punto neutro, basterà, per eliminarla, misurare anche la tensione verso terra della terza fase.

Quando in luogo del secondo voltmetro si adoperi una resistenza, O_1 si determina col voltmetro elettrostatico, misurando, a resistenza inserita, successivamente la tensione verso terra del polo 1, a cui è attaccata la resistenza, e quella di un altro polo (od al caso di entrambi gli altri).

Otteniamo così (fig. 8) il triangolo $A_1 O_1 O$, già contemplato in un problema precedente. Se rappresentiamo la corrente

$$I = \frac{A_1 O_1 \cos \varphi}{\varrho},$$

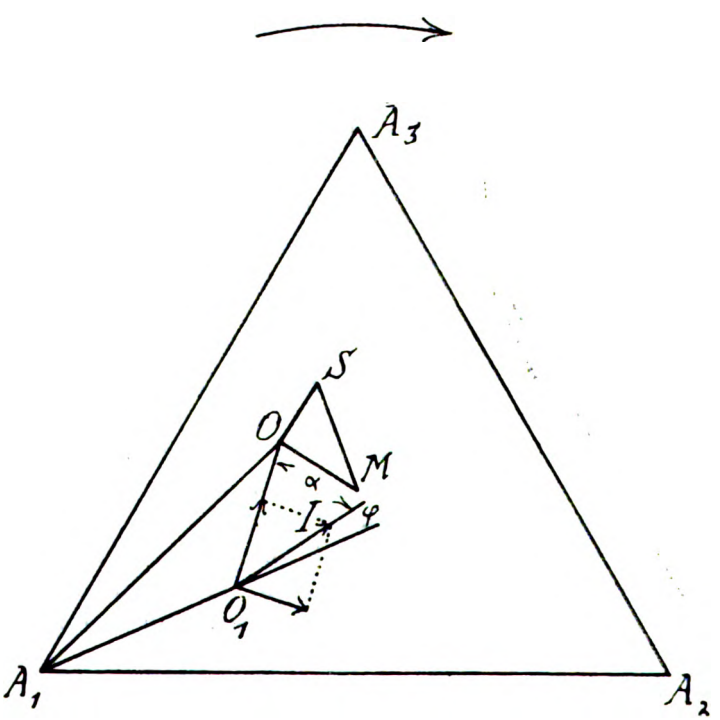


Fig. 8.

che attraversa il voltmetro, con un segmento $O_1 I$ in ritardo di φ rispetto ad $A_1 O_1$, le sue componenti in fase e in quadra-

Digitized by Google

tura rispetto O_1O rappresentano le correnti di dispersione e di capacità uguali rispettivamente a

$$\frac{O_1O}{R} \quad \text{e} \quad O_1O \cdot \omega C,$$

sicchè è facile dedurre i valori della resistenza d'isolamento e della capacità globale.

Per trovare le singole resistenze di isolamento occorre determinare il punto S. Pel sistema trifase dobbiamo a tal fine supporre che le capacità siano uguali fra loro, sicchè il loro centro coincida col baricentro M del triangolo $A_1 A_2 A_3$; ed allora basta tracciare la M S, in ritardo rispetto ad M O dell'angolo $\alpha = I\widehat{O_1}O$, ad incontrare la O S perpendicolare ad M O. Pel sistema monofase invece non è necessaria alcuna restrizione, inquantochè, condotta per O una retta in ritardo rispetto $A_1 A_2$ dell'angolo α e che l'incontra in N, questo punto N è il punto neutro del sistema delle sole capacità, i cui singoli valori potranno allora venire trovati in modo analogo a quello, secondo il quale dalla posizione del punto S si deducono i valori delle conduttibilità di isolamento.

Oltre a questa soluzione generale, vogliamo far cenno anche di altre costruzioni, per quanto meno semplici, e valevoli solo nell'ipotesi dell'uguaglianza delle capacità e dell'uso di una resistenza o di un voltmetro con $\cos\varphi = 1$, sia per avere un controllo nei risultati, sia anche per mostrare come, pur partendo dalle stesse misure, siano possibili varianti nella trattazione di questi problemi.

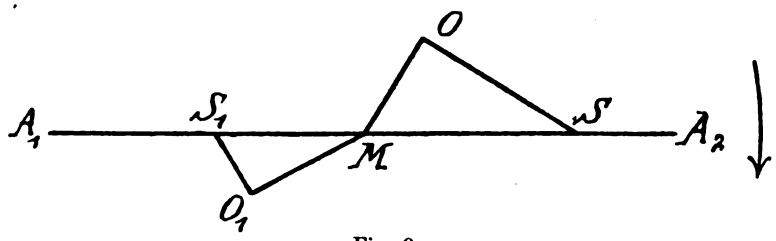


Fig. 9.

Nel caso del sistema monofase, determinati come precedentemente i punti O ed O_1, unendoli con M si ottengono i due angoli $O\widehat{M}S$, $O_1\widehat{M}S_1$ (fig. 9) tali che:

Digitized by Google

$$\operatorname{tg} O\widehat{M}S = \omega C R = \frac{\omega C}{\frac{1}{R}}$$

$$\operatorname{tg} O_1\widehat{M}S_1 = \frac{\omega C}{\frac{1}{R} + \frac{1}{\varrho}}$$

equazioni da cui si ricavano facilmente C ed $\frac{1}{R}$.

La soluzione si completa al solito colla considerazione del punto S.

Nel caso del sistema trifase possiamo osservare che ai punti O ed O_1 corrispondono rispettivamente due punti S ed S_1 (fig. 10)

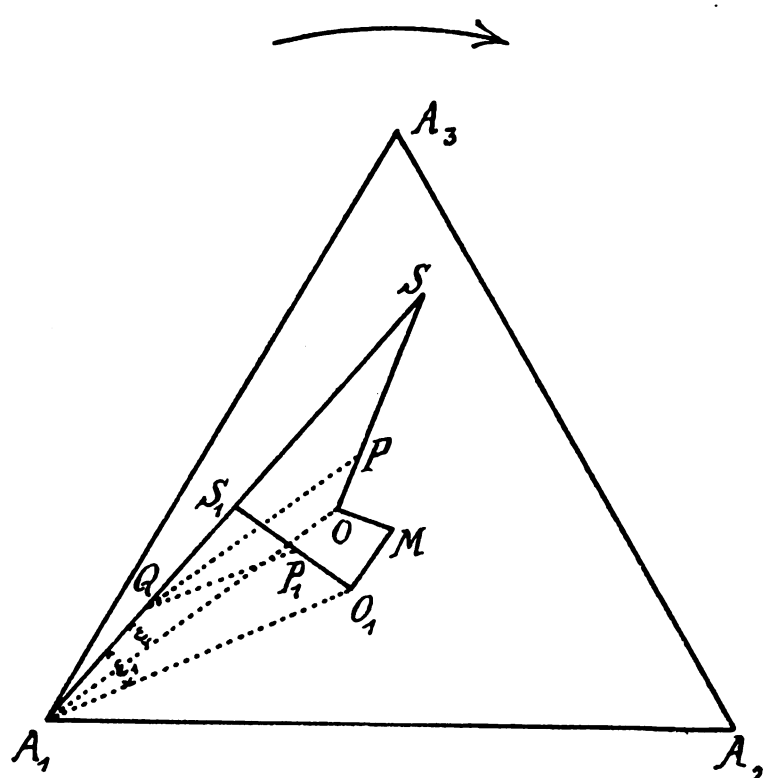


Fig. 10.

allineati con A_1, perchè il sistema di centro S_1 risulta dal sistema di centro S e dalla resistenza ϱ in A_1, e la corrente fittizia I è in fase con ciascuna delle tensioni $A_1 S_1$ e $S_1 S$, trattandosi soltanto di resistenze ohmiche.

Digitized by Google

Data la relazione che passa fra questi sistemi, ha luogo la uguaglianza:

$$A_1 S \frac{1}{R} = A_1 S_1 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\varrho}\right).$$

Considerando inoltre la composizione del sistema delle capacità (di punto neutro M) rispettivamente coi sistemi S ed S_1 possiamo scrivere le equazioni:

$$SO \frac{1}{R} = OM \,.\, \omega C$$

$$S_1 O_1 \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\varrho}\right) = O_1 M \,.\, \omega C$$

e quindi anche:

$$\frac{SO}{OM} \frac{1}{R} = \frac{S_1 O_1}{O_1 M} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\varrho}\right).$$

Eliminando le resistenze tra questa equazione e la prima scritta otteniamo:

$$\frac{SO}{S_1 O_1} = \frac{OM}{O_1 M} \cdot \frac{A_1 S}{A_1 S_1},$$

condizione che caratterizza in modo puramente geometrico la retta $A_1 S_1 S$.

Condotte le $A_1 O$, $A_1 O_1$, chiamiamo rispettivamente ε ed ε_1 gli angoli che esse formano colla $A_1 S$.

Dai triangoli $A_1 O S$, $A_1 O_1 S_1$ risulta:

$$\frac{SO}{\operatorname{sen} \varepsilon} = \frac{A_1 S}{\operatorname{sen} A_1 \widehat{O} S}, \qquad \frac{S_1 O_1}{\operatorname{sen} \varepsilon_1} = \frac{A_1 S_1}{\operatorname{sen} A_1 \widehat{O_1} S_1},$$

sicchè la condizione voluta si trasforma nell'altra:

$$\frac{\operatorname{sen} \varepsilon}{\operatorname{sen} \varepsilon_1} = \frac{OM \operatorname{sen} A_1 \widehat{O} S}{O_1 M \operatorname{sen} A_1 \widehat{O_1} S_1}.$$

Se si ribalta O M su O S in O P e analogamente O_1 M su $O_1 S_1$ in $O_1 P_1$, è facile vedere che le perpendicolari (non se-

Digitized by Google

gnate in figura), condotte da P e da P_1 rispettivamente alle rette $A_1 O$ e $A_1 O_1$, hanno lunghezze eguali a $O M \operatorname{sen} A_1\widehat{O}S$ e a $O_1M \operatorname{sen} A_1\widehat{O}_1S_1$. Epperò basterà condurre per P e P_1 le parallele rispettivamente a A_1O e A_1O_1, per determinare colla loro intersezione un punto Q, che, congiunto con A_1, fornisce una retta sulla quale si trovano anche i punti S ed S_1; la cui posizione è allora senz'altro determinata. La soluzione si termina come nel caso del sistema monofase.

b) *Misure con due voltmetri che consumano corrente.* -- I due istrumenti sieno caratterizzati dalle costanti ϱ_1, L_1 e ϱ_2, L_2, oppure ϱ_1, φ_1 e ϱ_2, φ_2.

Si possono immaginare svariate combinazioni di misure. Un metodo che si applica tanto al sistema trifase che al monofase è il seguente:

Si determini mediante le rispettive letture ai voltmetri, inseriti contemporaneamente verso terra, il punto neutro O_1 del sistema, che risulta quando l'uno degli strumenti è attaccato al polo 1 e l'altro al polo 2; quindi si determini il punto neutro O_2, che si ottiene dopo avere scambiato di posto tra loro i due voltmetri. (Per l'applicazione di questo metodo i due voltmetri devono naturalmente possedere impedenze diverse; tale limitazione però non è necessaria per altre varianti che verranno esposte in seguito).

Nei due casi siano U_1 ed U_2 i punti neutri dei sistemi formati dai soli voltmetri; essi si trovano in base alle considerazioni seguenti. I voltmetri sono in serie rispetto alla tensione concatenata $A_1 A_2$, la quale si può quindi scomporre in due componenti in quadratura: l'una corrispondente alla somma delle resistenze ohmiche, l'altra corrispondente alla somma delle resistenze induttive dei due voltmetri; e poichè la prima componente deve avere la direzione della corrente che attraversa gli strumenti, esse verranno rappresentate rispettivamente dai due segmenti $A_1 D$ e DA_2 (fig. 11), essendo D il punto di intersezione della semicirconferenza descritta su $A_1 A_2$ come diametro colla retta A_1D, ritardata rispetto ad $A_1 A_2$ dell'angolo

$$\Phi = \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega (L_1 + L_2)}{\varrho_1 + \varrho_2} .$$

Dividendo $A_1 D$ in E_1 nel rapporto

$$A_1 E_1 : E_1 D = \varrho_1 : \varrho_2$$

Digitized by Google

e $D A_2$ in F_1 nel rapporto

$$D F_1 : F_1 A_2 = L_1 : L_2$$

l'intersezione delle $E_1 U_1$ e $F_1 U_1$, parallele rispettivamente a $D A_2$ e $D A_1$, fornisce il punto U_1. Analogamente si trova il punto U_2, che riesce simmetrico di U_1 rispetto al punto di mezzo di $A_1 A_2$.

Se O (di posizione per ora ignota) rappresenta al solito il punto neutro del sistema dato, i due triangoli $O O_1 U_1$, $O O_2 U_2$ (fig. 12) risultano simili, potendosi entrambi riferire alla composizione del sistema dato di punto neutro O col sistema dei due voltmetri in parallelo, essendo nei due casi diversa soltanto la posizione (U_1 od U_2) del punto neutro del secondo sistema.

Il punto O si può quindi determinare come intersezione dei

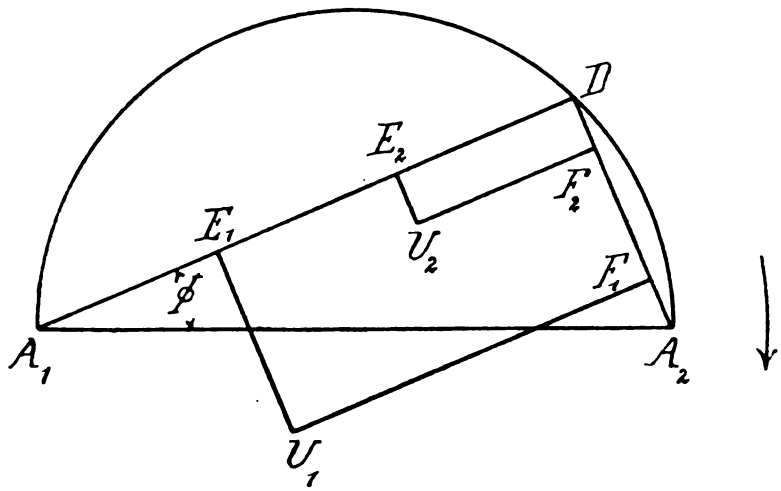


Fig. 11.

luoghi geometrici (circonferenze) dei punti, le cui distanze da U_1 ed U_2, e rispettivamente da O_1 e O_2, stanno fra loro nel rapporto $U_1 O_1 : U_2 O_2$. Ottenuto il punto O, basterà in appresso considerare uno soltanto dei triangoli $O O_1 U_1$, $O O_2 U_2$, ad es. il primo.

Pel sistema trifase si può anche pervenire al triangolo $O O_1 U_1$, in modo del tutto analogo al precedente, determinando come prima i punti U_1 ed O_1, e poi due nuovi punti U'_2 e O'_2, corrispondenti all'inserzione contemporanea dei voltmetri fra la terra e due altre fasi, per esempio, la 2 e la 3.

Digitized by Google

Poichè ciascuno dei punti O_1, O_2 ed O si ottiene come intersezione di due circonferenze, si vede che in generale vi potrà essere incertezza nella scelta della soluzione corrispondente alla realtà; epperò per questo motivo (oltrechè per la maggiore complicazione) questo metodo riesce inferiore al precedente, in cui

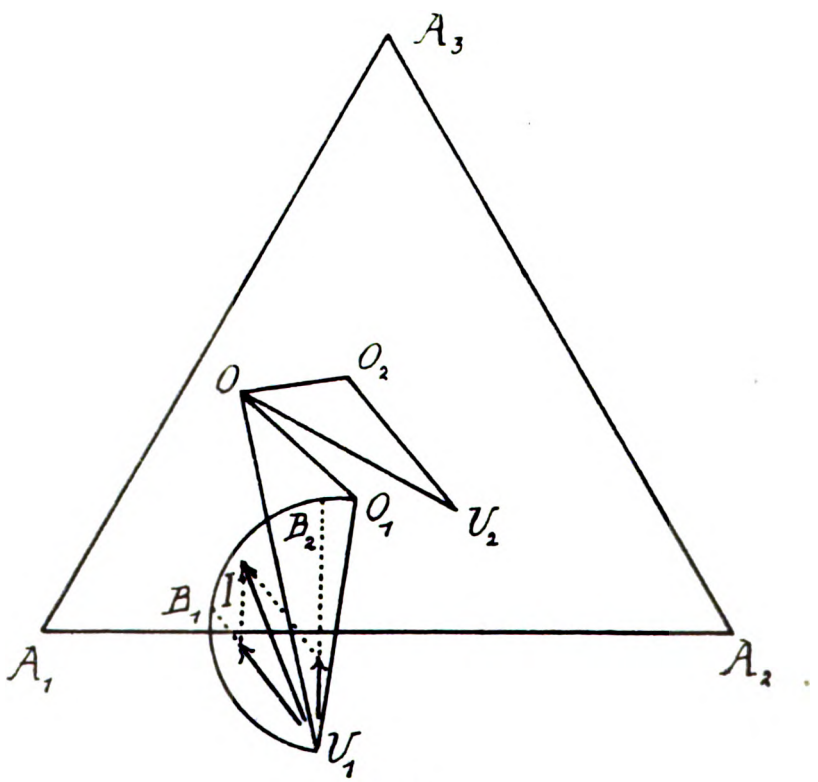


Fig. 12.

uno dei voltmetri impiegati era elettrostatico. L'incertezza però potrà spesso venire eliminata mediante i criteri già accennati in altra occasione. Se per entrambi i voltmetri $\cos\varphi = 1$, oltre al punto O, anche i punti O_1 ed O_2 devono cadere entro il perimetro limite.

Per limitare l'incertezza si può adottare la seguente variante (in ogni caso pel sistema trifase, quando sia accessibile il punto

Digitized by Google

di mezzo di un avvolgimento pel sistema monofase), variante però che richiede una misura in più. Si trovi cioè, nel modo già descritto a suo tempo, il punto O mediante tre letture successive a un sol voltmetro, e quindi come precedentemente il punto O_1, pel quale soltanto può rimanere eventualmente incertezza di scelta.

Ottenuto così con uno qualunque dei modi descritti il triangolo $O\,O_1\,U_1$, la soluzione del problema si completa facilmente. Il sistema di punto neutro O_1 si può considerare composto di due sistemi aventi rispettivamente per punti neutri O ed U_1; ed il passaggio dai sistemi componenti al sistema risultante si può al solito immaginare dovuto a due tensioni addizionali, l'una eguale ad $O\,O_1$ ed agente sul sistema dato, l'altra eguale a $U_1\,O_1$ agente sul sistema dei voltmetri in parallelo. La corrente I corrispondente a tali tensioni può venire trovata facilmente. Si descriva una semicirconferenza su $U_1\,O_1$ dalla parte degli angoli di ritardo e si conducano le corde $U_1\,B_1$ e $U_1\,B_2$, formanti con $U_1\,O_1$ rispettivamente gli angoli

$$\varphi_1 = \text{arc tg}\,\frac{\omega L_1}{\varrho_1} \quad \text{e} \quad \varphi_2 = \text{arc tg}\,\frac{\omega L_2}{\varrho_2}\ ;$$

esse rappresentano le componenti ohmiche della tensione $U_1\,O_1$, epperò dividendole per ϱ_1 e ϱ_2 si ottengono le correnti I_1 e I_2, la cui risultante fornisce la I in grandezza e direzione. Dopodichè si procede, considerando le componenti di I secondo $O_1\,O$ e perpendicolarmente ad esso, come nel caso già trattato in cui uno dei voltmetri è elettrostatico.

Se per entrambi i voltmetri $\cos\varphi = 1$, le costruzioni ausiliari (dei punti U_1 ed U_2 e della corrente I) restano notevolmente semplificate.

***

Se confrontiamo fra loro le soluzioni indicate, possiamo dire che il metodo che riunisce il maggior numero di pregi, è quello basato sull'uso di un voltmetro elettrostatico e di un altro voltmetro, che consuma corrente, oppure di una resistenza ausiliare; esso difatti non richiede la conoscenza delle capacità, anzi serve alla loro determinazione, si applica così al sistema trifase come al monofase, non dà luogo ad incertezze nella scelta della solu-

Digitized by Google

zione, è semplice sia nei concetti teorici che nella costruzione del diagramma. Praticamente si applicherà bene sopratutto la variante con una resistenza ausiliare, quando essa sia di valore regolabile, tale cioè da poter venire per tentativi adattata alle condizioni più opportune per le misure. Sarebbe altresì utile di disporre di almeno due voltmetri elettrostatici con limiti di scala diversi, in modo da avere un campo più esteso per la misura esatta delle tensioni.

Anche con questo metodo però, quando le correnti di capacità soverchino notevolmente quelle che attraversano le resistenze di isolamento, si potranno incontrare delle difficoltà, sia nella determinazione esatta della conduttibilità globale, sia, ed ancor più, nella sua scissione nelle conduttibilità d'isolamento delle singole fasi.

In tal caso è teoricamente possibile di diminuire (e persino di annullare) l'influenza perniciosa della capacità sulle misure mediante opportune bobine di autoinduzione, inserite fra i poli e la terra. Possiamo immaginare sostituita ciascuna bobina, di resistenza r e di coefficiente di autoinduzione l, col gruppo equivalente formato dalla resistenza r_1 e dall'autoinduzione l_1 in parallelo fra loro, tali che:

$$r_1 = r + \frac{(\omega l)^2}{r}$$

$$l_1 = l + \frac{r^2}{\omega^2 l}.$$

La conduttibilità apparente dovuta alle capacità resta diminuita di quella corrispondente alle autoinduzioni l_1, mentre la conduttibilità ohmica, dovuta alle resistenze di isolamento preesistenti, viene aumentata di quella introdotta mediante le resistenze r_1; per la riuscita del metodo il valore globale di queste ultime deve essere di grandezza tale da non mascherare alla sua volta quello delle resistenze incognite. Praticamente però la complicazione, che in tal modo si introduce, non sembra corrispondente all'importanza delle misure.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

La détermination des résistances d'isolement présentées par les pôles d'une installation à courant alternatif simple ou triphasé (dont le point neutre n'est pas mis à la terre) constitue un problème tres complexe, parce que les courants, qui s'écoulent vers la terre, ont deux causes différentes: les défauts d'isolement et les capacités des pôles par rapport à la terre.

A ce propos l'A. développe une théorie graphique simple de la question, en résolvant les divers problèmes par des diagrammes d'une construction trés facile, déduits des lectures d'un ou deux voltmètres branchés entre les pôles de la source et la terre.

Chaque solution comporte deux opérations: on détermine d'abord la résistance globale d'isolement (c'est-à-dire, résultante des résistances des pôles en parallèle) et l'on en déduit ensuite les valeurs des résistances composantes.

C'est la première partie, qui caractérise les méthodes employées dans cette communication; elle est constituée essentiellement, dans la plupart des cas, par l'étude des relations de position existantes dans le diagramme topographique entre les points neutres du système donné et d'autres systèmes fictifs composants, ou bien de celles qui se rencontrent entre les points neutres du système donné, du système des voltmètres et du système résultant des deux premiers. On en déduit la valeur de l'angle $\alpha = \operatorname{arc\,tg}\, \omega CR$ *(où C et R indiquent la capacité et la résistance globale), qui joue un rôle important dans la solution.*

Après avoir déterminé la résistance globale et le point neutre du système des résistances seules, on trouve les résistances d'isolement de chaque pôle en utilisant la propriété, consistant à composer ou décomposer des conductances ohmiques (que l'on imagine appliquées en des points donnés d'un diagramme) en suivant les règles de la composition des forces parallèles.

Si les courants de fuite sont, dans l'état normal d'isolement, beaucoup plus faibles que les courants de capacité, le point neutre de l'installation ne quitte la position déterminée par les valeurs des capacités

Digitized by Google

que si l'isolement diminue notablement, tandis que des défauts moins remarquables restent tout à fait masqués. Des bobines de self d'une valeur convenable, branchées entre les pôles et la terre, pourraient augmenter la sensibilité de la méthode, mais elles introduiraient pratiquement une complication excessive.

Dans un premier chapitre l'A. suppose que les capacités par rapport à la terre sont connues (dans ce cas un voltmètre de type convenable suffit pour la détermination des résistances d'isolement), tandis qu'un deuxième chapitre envisage l'hypothèse que les capacités sont inconnues; celles-ci sont déterminées en même temps que les résistances, en employant deux voltmètres.

Les problèmes résolus et discutés dans la communication sont les suivants:

A) Détermination des résistances d'isolement, les capacités par rapport à la terre étant connues.

1. Mesure avec voltmètre électrostatique. — *L'instrument n'altère pas les valeurs des tensions entre les pôles et la terre, et fait ainsi connaître immédiatement par le diagramme le point neutre O relatif au système donné. On déduit la position du point neutre M du système fictif formé par les capacités seulement d'après les valeurs des capacités. Si S est le point neutre du système fictif des résistances seules, la résistance globale R et la capacité globale C peuvent être considérées en série par rapport à la tension fictive MS; par suite dans le triangle MOS est* $M\hat{O}S = \frac{\pi}{2}$ *et* $O\hat{M}S = \alpha = arc\ tg\omega\ CR$.

Système monophasé. — *Apres avoir construit le triangle rectangle MSO on déduit la résistance globale R des valeurs de α et de C, et le rapport entre les résistances composantes de la position du point S sur la droite, qui représente la tension entre fils.*

Système triphasé. — *On ne peut résoudre le problème que si l'on ajoute une autre donnée; il présente, en effet, trois inconnues, tandis que les tensions de deux pôles par rapport à la terre suffisent pour la détermination du point neutre du système. Dans l'hypothèse où la résistance globale est connue, on peut construire le triangle MOS et décomposer cette résistance globale appliquée en S suivant les résistances d'isolement des trois pôles.*

2. Mesures avec voltmètre absorbant du courant. — *On considère le cas général, dans lequel le voltmètre possède non seulement de*

Digitized by Google

la résistance, mais aussi de la selfinductance. Son branchement entre un pôle et la terre équivaut à l'introduction d'un défaut; en intercalant, par suite, le voltmètre successivement entre chaque pôle et la terre, on lit des tensions qui sont, non pas égales, mais, comme on peut le démontrer facilement, proportionnelles aux tensions préexistantes.

Système triphasé. — *On déduit la position du point neutre du système donné de la relation indiquée entre les tensions préexistantes et les lectures. Dans le système résultant du système donné et du voltmètre le courant qui traverse ce dernier se partage entre les capacités et les résistances d'isolement; cette observation est le point de départ d'une construction, qui permet de déterminer l'angle* α *et, en conséquence, la résistance globale. Pour l'application de la méthode il est nécessaire que le voltmètre ait une sensibilité et une impédance appropriées.*

Système monophasé. — *Le problème a été déjà résolu d'une manière générale par l'usage d'un électromètre; l'A. considère ici les deux seuls cas particuliers suivants:*

1) on peut mesurer (avec un voltmètre dont le $\cos\varphi$ *a une valeur quelconque) la tension entre la terre et le milieu de l'enroulement de la source;*

2) le $\cos\varphi$ *de l'instrument est égal à l'unité (p. ex., voltmètre thermique).*

B) Détermination des résistances d'isolement et des capacités par rapport à la terre.

Les solutions indiquées peuvent être appliquées également à un système triphasé et à un système monophasé.

1. Mesures avec un voltmètre électrostatique et un voltmètre absorbant du courant. — *Le deuxième instrument peut être remplacé par une résistance ohmique (ou par toute autre dérivation).*

Les mesures donnent directement les positions du point neutre du système donné et du système composé par le premier et le voltmètre absorbant du courant (ou la résistance auxiliaire). Ainsi qu'on l'a observé dans une autre occasion, le courant voltmétrique se partage entre C et R; dans ce cas le diagramme fait connaître aussitôt la tension, à laquelle ces grandeurs sont soumises. Par suite l'on peut déduire la résistance et la capacité globale des valeurs des composants du courant respectivement en phase et en avance de 90° par rapport à cette tension.

L'application de la méthode exposée est particulièrement commode si

Digitized by Google

l'on emploie un voltmètre statique et une résistance réglable *suivant les besoins; on peut ainsi choisir la résistance, par tâtonnement, d'un ordre de grandeur convenable pour les mesures.*

L'A. indique aussi d'autres constructions valables pour le cas particulier d'un voltmètre avec $\cos\varphi = 1$ *(ou d'une résistance).*

2. Mesures avec deux voltmètres absorbant du courant. — *Les mesures et les constructions développées sont moins commodes que celles indiquées pour le cas précédent. Les constructions se simplifient beaucoup si le facteur de puissance (cos* φ*) des deux voltmètres est égal à l'unité.*

DISCUSSION

Le Président KENNELLY *remercie M. Dina de son intéressante communication, dont il fait remarquer toute l'importance non seulement théorique mais encore pratique. La mesure, pendant le service, d'une installation à courants alternatifs est, en fait, très compliquée parce que le courant de dispersion résulte de deux composantes orthogonales.*

M. DINA *a présenté une solution du problème qui sera très utile dans la pratique, comme ne nécessitant que des calculs assez simples.*

Personne n'ayant des objections, le Président donne suite à la séance.

Digitized by Google

Sur un nouveau procédé oscillographique à l'aide du tube de Braun.

J. L. FARNY

Professeur à l'École polytechnique fédérale - Zurich.

Les recherches entreprises au moyen du tube de Braun et les dispositifs utilisés à cet effet, ont fait l'objet de publications nombreuses et remarquables. Il suffit de se rappeler celles de MM. Braun, Zenneck, Ebert, Wehnelt et Donath, Seefehlner, Weinhold, Simon, etc., pour se former une idée de l'utilité de cet instrument d'investigation et de démonstration.

Par les résultats de l'étude présentée ici, cet instrument reçoit de nouveaux moyens auxiliaires, robustes et simples, lui permettant de représenter directement en coordonnées cartésiennes, par un trait luminescent tranquille, les valeurs d'une tension ou d'un courant en fonction du temps.

Ces résultats sont donc, je crois, de nature à généraliser l'usage du tube à rayons cathodiques.

Dans les numéros 1 et 2 de la première année du " Bulletin de l'Association Suisse des Électriciens „, j'ai décrit des machines permettant de produire des ondes asymétriques de forces électromotrices, c'est-à-dire des ondes représentables par la figure 1.

Rappelons, en quelques mots, le principe de cette génération d'ondes :

Des pôles dont les épanouissements ne mesurent que la dixième ou vingtième partie du pas polaire déterminent dans des bobines d'induit des variations de flux magnétique, dont les unes, d'ordre impair, sont rapides, tandis que les autres, d'ordre pair, sont inverses aux précédentes et très lentes. En d'autres termes :

Digitized by Google

selon certains cas, le flux magnétique entre très rapidement dans ces bobines et n'en ressort que très lentement, ou bien, en d'autres cas, son changement de sens à l'intérieur de ces bobines s'effectue du positif au négatif en un temps très court,

Fig. 1.

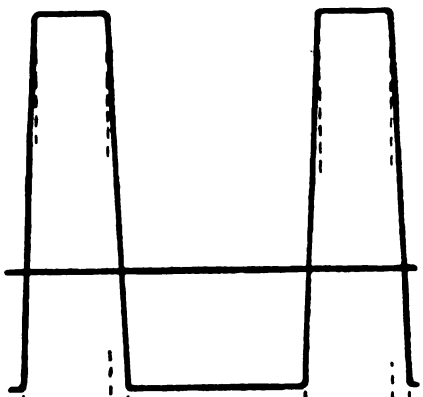


Fig. 2.

tandis que son inversion du négatif au positif n'a lieu que très lentement.

Pour que ces forces électromotrices puissent être actives, c'est-à-dire pour qu'elles soient à même d'engendrer des courants notables, il est indispensable que les enroulements dans lesquels elles se développent aient peu de selfinduction et par conséquent il faut, avant tout, prendre des mesures pour que l'intégrale curviligne des forces magnétisantes produites par ces courants soit nulle à chaque instant principalement le long d'un cercle ayant son centre sur l'axe de rotation de la machine et sa périphérie dans le fer même de l'induit.

Digitized by Google

Se demande-t-on quelle est, par rapport au temps, la loi de variation du courant produit par un alternateur de cette sorte dans une résistance presque exclusivement inductive, ou lorsque l'alternateur est court-circuité sur lui-même, on trouve que ce doit être un courant dont les valeurs successives sont représentables par la figure 2.

En effet, on a, en négligeant la résistance ohmique:

$$e - \mathrm{L}.\frac{di}{dt} = 0$$

e = force électromotrice instantanée; L = coefficient de selfinduction du circuit, supposé constant; i = intensité instantanée du courant; t = temps.

Cette équation est satisfaite, dans les intervalles de temps durant lesquels e = constante, par la condition $\frac{di}{dt}$ = constante, ce qui donne une droite inclinée. On obtient donc bien, comme représentation du courant en fonction du temps, deux droites différemment inclinées en sens contraires, et raccordées par une courbe dans le voisinage de leur point d'intersection.

Si l'on utilise un courant de cette sorte pour créer des déviations du faisceau cathodique d'un tube de Braun, que l'on suppose alimenté d'une façon continue et constante par une machine électrostatique, ces déviations déterminent, durant les intervalles caractérisés par $\frac{di}{dt}$ = constante, des mouvements uniformes de va et vient du point luminescent sur l'écran du tube et la vitesse constante d'aller du point en question est beaucoup plus grande que celle du retour.

Si, par contre, les rayons cathodiques n'existent que pendant la durée de l'aller du point luminescent et cessent d'être émis pendant que ce point, dans l'hypothèse précédente d'une émission ininterrompue, décrit son mouvement de retour, il en résulte que le point luminescent ne traverse plus l'écran que dans un sens et s'évanouit au bout de sa course pour renaître aussitôt après à l'autre extrémité de l'écran. On reconnait que le point luminescent décrit ainsi un mouvement tel qu'il le faut pour la génération des abscisses dans un oscillographe.

Le problème est par suite ramené à la création de rayons cathodiques intermittents n'ayant d'existence que pendant les intervalles durant lesquels le courant déviateur, à variation

Digitized by Google

rectiligne, passe de son maximum positif à son maximum négatif, ou, au choix, durant la variation plus rapide du négatif au positif de ce courant.

Or, il est aisé, à l'aide d'un alternateur donnant des ondes de forces électromotrices asymétriques, telles que représentées en figure 1, d'engendrer des rayons cathodiques ainsi intermittents. Il suffit, en effet, de clancher un alternateur de cette sorte sur le primaire d'un transformateur de tension et de fermer le circuit secondaire de ce transformateur au travers du tube de Braun, en ayant soin de tenir compte du sens du courant. Le transformateur de tension a pour mission de fournir, par son secondaire, des forces électromotrices dont les valeurs successives en fonction du temps se représentent également par la figure 1, mais à une échelle indiquant des valeurs de forces électromotrices considérablement amplifiées. La valeur des maxima des forces électromotrices positives, c'est-à-dire correspondant aux sommets positifs de la courbe donnée en figure 1, doit être supérieure à la tension critique requise pour le passage du courant dans le sens de l'anode à la cathode du tube, et il faut que les forces électromotrices négatives restent inférieures à la tension critique à laquelle le courant peut exister de la cathode à l'anode du tube. On voit, qu'à cette double condition, il doit résulter au travers du tube un courant intermittent uniquement dirigé dans un sens, c'est-à-dire orienté de l'anode à la cathode du tube. Ce courant donne naissance à un faisceau cathodique, intermittent comme lui-même, et qui frappe l'écran du tube, tout en subissant les déviations que lui imprime le courant déviateur à variation rectiligne, dont il fut question tout à l'heure.

Ce faisceau cathodique peut, en outre, subir simultanément les déviations perpendiculaires aux précédentes que lui impose le courant, ou la tension dont on désire étudier la loi en fonction du temps.

La figure 3 représente schématiquement le nouveau dispositif oscillographique. Dans cette figure G_1 indique l'alternateur dont, au moyen des bobines F, on étudie, par exemple, la variation du courant qu'il envoie dans la résistance R; G_2 représente le petit alternateur spécial qui fournit le courant traversant les bobines D et déviant les rayons cathodiques dans le sens des abscisses; G_3 indique le second petit alternateur du type précédent, développant par l'intermédiaire du transformateur T les

Digitized by Google

rayons cathodiques intermittents; G_1, G_2 et G_3 sont accouplés ou en synchronisme; B symbolise le tube de Braun.

En sacrifiant un peu de la facilité de réglage, il n'est pas impossible, dans certains cas, de supprimer l'un des petits alternateurs. Le primaire du transformateur T et les bobines D forment alors deux circuits parallèles alimentés par le seul petit alternateur spécial restant.

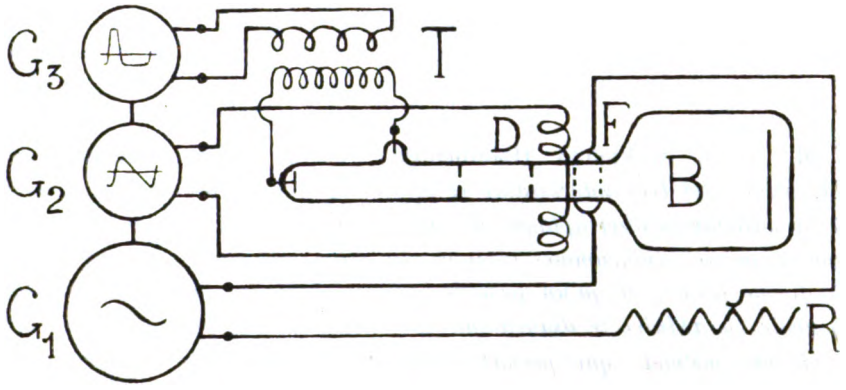


Fig. 3.

La méthode décrite est en défaut lorsque le phénomène à observer dure plus longtemps qu'une des illuminations intermittentes du tube. Il faut alors diminuer la vitesse des générateurs G_2 et G_3; dans certains cas il suffit d'insérer une bobine de réactance dans le circuit secondaire du transformateur T. D'autres moyens sont prévus, mais attendent d'être éprouvés.

Les avantages de la méthode apparaissent surtout en vue de l'inscription des ondulations électriques de très hautes fréquences. La périodicité du courant déviateur à variation rectiligne peut être choisie très grande, d'où doit résulter que la grande vitesse de la tache lumineuse dans le sens des abscisses n'implique pas une diminution excessive de l'éclat lumineux de la courbe décrite sur l'écran.

Le courant générateur des rayons cathodiques n'étant qu'intermittent, il est possible de lui donner une intensité instantanée très forte, sans trop échauffer le tube: c'est encore une raison de conservation d'une courbe vivement luminescente, même aux très hautes fréquences.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). *La communication de M. Farny est très intéressante et apporte une contribution remarquable à la méthode oscillographique à l'aide du tube de Braun: en fait, il est connu que les diagrammes obtenus par cette méthode se présentent sous la forme polaire et qu'un procédé assez laborieux est nécessaire pour pouvoir en déduire le diagramme cartésien: or, M. Farny nous a présenté une méthode qui permet d'obtenir directement le diagramme en coordonnées cartésiennes.*

Il serait intéressant que M. Farny veuille bien nous donner quelques détails ou indiquer les résultats de quelque expérience faite par cette méthode.

M. J. L. FARNY (Zurich). *Je ferai remarquer qu'en excitant l'alternateur G_3, on voit apparaître sur l'écran la tache luminescente; excitant ensuite l'alternateur G_2, il se forme une droite luminescente horizontale: c'est l'axe des abscisses. Enfin, si l'on fait produire du courant à l'alternateur G_1, et que ce courant soit, par exemple, une fonction sinusoïdale du temps, on constate sur l'écran un trait lumineux ayant la forme d'une sinusoïde rapportée à des coordonnées cartésiennes. Si la fonction représentant le courant renferme des harmoniques supérieurs, la courbe lumineuse diffère en conséquence d'une sinusoïde.*

S'il est un intervalle, dans la courbe indiquant la variation étudiée, qui soit particulièrement intéressant, on peut augmenter le courant à déviation rectiligne, de manière à étendre cet intervalle sur toute la surface de l'écran.

M. A. LARSEN (Copenhague) *demande où l'on peut acheter des alternateurs du type mentionné.*

M. J. L. FARNY (Zurich). *Quelques exemplaires ont été exécutés en rue d'une investigation, dans les ateliers du Laboratoire de Mécanique industrielle de l'École Polytechnique de Zurich, et ces spécimens ont*

Digitized by Google

permis de vérifier le principe de la méthode. Une fabrication industrielle de ces alternateurs n'existe pas encore à l'heure actuelle.

M. A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.) *demande si M. Farny est à même de faire voir des épreuves photographiques.*

M. J. L. FARNY (Zurich) *répond qu'il a fait la vérification de la méthode le 5 août écoulé, c'est-à-dire au moment même de son départ pour les vacances, et que par suite, il ne lui est pas possible, à son grand regret, d'accomplir ce désir.*

Digitized by Google

MÉTHODE DE DÉTERMINATION DU COURANT CONSTANT

produisant le même échauffement qu'un courant variable.

C. O. MAILLOUX (New York)

Le but de ce Mémoire est de faire connaître une nouvelle méthode pratique pour obtenir la valeur qui représente le *courant d'échauffement*, soit la racine carrée de la moyenne des carrés des ampères instantanés d'un courant électrique variable.

Cette méthode, développée par l'auteur il y a plusieurs années, et enseignée par lui dans les cours qu'il a professés à diverses écoles polytechniques, n'a pas encore été publiée.

But de la méthode. — Il arrive souvent que l'on ait à déterminer d'avance la hausse de température qui se produira, au bout d'un intervalle de temps donné, dans un conducteur traversé par des courants variables. Le conducteur en question peut constituer un enroulement de moteur, un câble, un rhéostat ou un dispositif quelconque formant partie d'un circuit électrique, et ayant une résistance ohmique sensible. La question est surtout d'intérêt pour les moteurs électriques fonctionnant à régime variable et irrégulier, comme c'est le cas pour les moteurs à traction, les moteurs d'ascenseur, de treuils, de laminoirs, etc., et aussi pour les transformateurs, les feeders, les rhéostats, etc.

Principes généraux. — Il s'agit ici de l'échauffement dû à la soidisante " perte ohmique „, lequel est une fonction des watts de puissance électrique absorbée et convertie en chaleur

Digitized by Google

par la résistance. Cet échauffement, on le sait, est toujours proportionnel au produit du carré du courant, en ampères (i), par la résistance en ohms (r), soit à $i^2\ r$.

Lorsque le régime est constant, (I), nous avons, au bout d'un intervalle de temps, $t = t_1 - t_0$, une dissipation d'énergie, w, sous forme de chaleur, dans la résistance r, égale à

$$\mathrm{w} = \mathrm{I}^2 r\,(t_1 - t_0) = \mathrm{I}^2 r t\,. \qquad (a)$$

Si le régime est variable, nous avons

$$\mathrm{w} = \int_o^t i^2 r\,dt\,. \qquad (b)$$

En supposant que la perte ohmique soit la même dans les deux cas nous pourrons poser

$$\mathrm{I}^2 r t = \mathrm{w} = \int_o^t i^2 r\,dt \qquad (c)$$

et aussi

$$\mathrm{I}^2 t = \int_o^t i^2\,dt \qquad (d)$$

d'où nous déduisons

$$\mathrm{I}^2 = \frac{1}{t}\int_o^t i^2\,dt \qquad (e)$$

et aussi

$$\mathrm{I} = \sqrt{\frac{1}{t}\int_o^t i^2\,dt}\,. \qquad (f)$$

Les équations (e) et (f) donnent des relations importantes entre les régimes variables et constants produisant le même échauffement dans les mêmes intervalles de temps.

L'équation (e) nous laisse voir que le carré du régime constant I, (soit I^2), est égal à l'ordonnée moyenne (Y) du graphique (fig. B) représentant les carrés (i^2) des ampères, en fonction du temps, ($i^2 = f(t)$)..

L'équation (f) indique que la valeur " efficace „ I, qui représente le courant constant produisant le même échauffement que le courant variable donné, est égal à la racine carrée de la moyenne, i^2.

Digitized by Google

Difficulté incidente. — Le problème se résume donc à trouver une certaine valeur " efficace „ du courant, laquelle doit être égale à la racine carrée de la moyenne des ordonnées de la courbe des carrés des ampères en fonction du temps, soit de la moyenne des ordonnées du graphique (fig. B) représentant la fonction $i^2 = f(t)$.

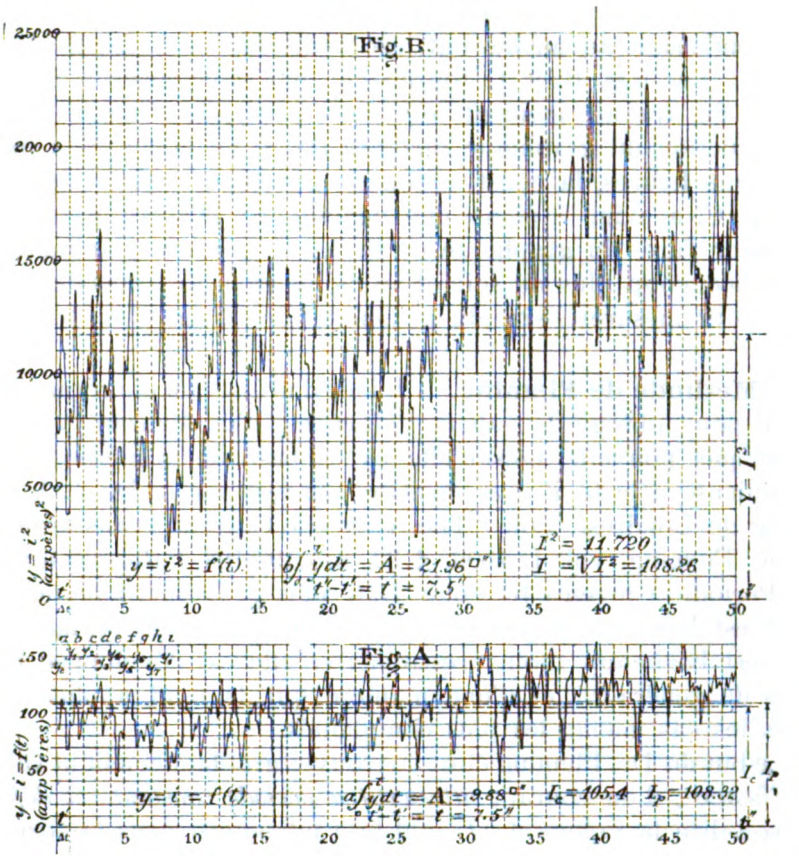
Il n'est pas facile, malheureusement, d'obtenir un graphique donnant les valeurs de i^2, comme dans la (fig. B), quoiqu'il soit assez facile d'obtenir un graphique des valeurs de i, comme dans la (fig. A), ce qui se fait couramment, dans la pratique, au moyen d'ampère-mètres enregistreurs.

Méthode ordinaire. — La méthode ordinaire de déterminer le courant " efficace „ comporte, cependant, la construction préalable d'un graphique des valeurs des carrés des courants, ($i^2 = f(t)$). Il faut mesurer, sur le graphique (fig. A) des ampères, ($i = f(t)$), un grand nombre d'ordonnées, d'autant plus rapprochées les unes des autres que les variations et irrégularités du régime (i) seront plus nombreuses et brusques. Il faut ensuite calculer le carré (i^2) de chaque ordonnée (i) ainsi mesurée. C'est avec ces valeurs que l'on construit le graphique des $i^2 = f(t)$. C'est de cette manière que le graphique des i^2 de la fig. B a été construit, en partant du graphique des i de la fig. A. Chaque ordonnée dans la fig. B, représente le carré de la même ordonnée de la fig. A. Après que le graphique des i^2 est construit, on en détermine l'ordonnée moyenne $Y = I^2$. Pour cela, il faut d'abord trouver l'aire du diagramme au moyen d'un planimètre, ou d'un intégraphe (instrument qui décrit la courbe intégrale). On mesure ensuite la longueur totale du diagramme. Il importe de se servir des mêmes unités de mesure linéaire. Ainsi, si l'aire est mesurée en centimètres carrés, ou en millimètres carrés, la longueur du diagramme devra être exprimée en centimètres pour le premier cas et en millimètres pour le second cas. Si, comme c'est le cas pour les diagrammes des figs. A, B, le planimètre donne une aire en *pouces carrés,* la longueur du diagramme devra s'exprimer en *pouces.* De toute manière, l'ordonnée moyenne sera égale (linéairement) au quotient de l'aire totale du diagramme divisée par sa longueur totale. La racine carrée de la valeur de cette ordonnée moyenne, lue à l'échelle du graphique, sera la valeur efficace cherchée, $I = \sqrt{I^2} = \sqrt{Y}$. Ainsi, dans le graphique de la fig. B, l'aire

Digitized by Google

étant de 21,96 unités de superficie (pouces carrés), et la longueur totale du diagramme (lorsqu'il est de grandeur naturelle) étant de 7,5 unités de longueur (pouces), l'ordonnée moyenne est égale, linéairement, à 2,93 unités (pouces). Puisque l'échelle

Fig. A et B.



du diagramme est de $i^2 = 4.000$ par unité, nous avons $2{,}93 \times 4.000 = 11.720 = Y = I^2$; et en prenant la racine carrée de cette valeur nous trouvons $I = \sqrt{11.720} = 108{,}26$ ampères.

Inconvénients. — Ce procédé, on le voit, est assez laborieux, même pour les cas les plus simples, c'est-à-dire quand le graphique des courants, $i = f(t)$, est une courbe relativement peu " accidentée „. Lorsque le graphique des i est très irrégulier et " dentelé „, la construction du graphique des i^2 devient

Digitized by Google

compliquée et laborieuse, en raison du grand nombre d'ordonnées qu'il faut calculer pour pouvoir arriver à un degré de précision satisfaisant. Le nécessité de construire le graphique des i^2 est donc un grand inconvénient de la méthode ordinaire.

La méthode de l'auteur obvie à cet inconvénient en supprimant tout-à-fait le graphique des i^2, (fig. B), et en le remplaçant par un graphique des i de forme *polaire*, (fig. C), qui, tout en conduisant au même but, est beaucoup plus facile à construire. Les figs. B et C fournissent une comparaison intéressante du travail incident aux deux méthodes. Tandis que la construction du graphique *cartésien* des i^2 de la fig. B a exigé plusieurs heures, la construction du graphique *polaire* des i, de la fig. C, a exigé à peine une demi-heure. D'autre part, pour mesurer l'aire du graphique de la fig. B avec un planimètre, il faut beaucoup plus de soin et au moins trois fois plus de temps que pour mesurer l'aire du graphique de la fig. C.

Méthode de Fleming. — L'idée d'utiliser un diagramme polaire pour obtenir la valeur " efficace „ d'un courant variable n'est pas nouvelle, puisqu'elle est la base de la méthode fort ingénieuse décrite, il y a plusieurs années, par le Dr. J. A. Fleming de Londres. (Voir " The Alternate Current Transformer „, J. A. Fleming, vol. I, 1896, § 32, pp. 190-194, " Representation of Periodic Currents by Polar Diagrams „). La méthode de l'auteur est basée identiquement sur les mêmes principes, mais son but est beaucoup moins restreint; et elle est développée avec plus de généralité, et d'une manière qui la rend applicable à tous les cas, même les plus compliqués.

Le but du Dr. Fleming était de trouver graphiquement la valeur " efficace „ d'un courant *alternatif à période constante et définie*, c'est-à-dire la valeur de I qu'il faut introduire dans la formule $w = I^2 r$ pour exprimer exactement la puissance dissipée (w) par perte ohmique dans un circuit traversé par un courant alternatif, quand le régime est constant (I_{max} = constante).

La méthode du Dr. Fleming est basée sur les conséquences géométriques et analytiques de la transformation d'un graphique à coordonnées rectangulaires (" cartésiennes „) en un graphique à coordonnées polaires. (Voir la note *A* annexée à ce Mémoire). Ainsi que le Dr. Fleming l'a démontré, la courbe des sinus, $y = \sin t$, dont la forme géométrique est bien connue lorsqu'elle est représentée par un graphique cartésien ordinaire (fig. 1),

Digitized by Google

revêt la forme d'un *cercle*, lorsqu'elle est représentée par un graphique polaire (fig. 2); et, tandis que l'ordonnée moyenne, I_c, du graphique cartésien d'une sinusoïde simple sera égale à la vraie moyenne arithmétique de toutes les ordonnées, soit à 0,637 de l'ordonnée maxima, I_{max}, (puisque nous aurons toujours $I_c = 0{,}637\ I_{max}$), l'ordonnée moyenne, I_p, du graphique po-

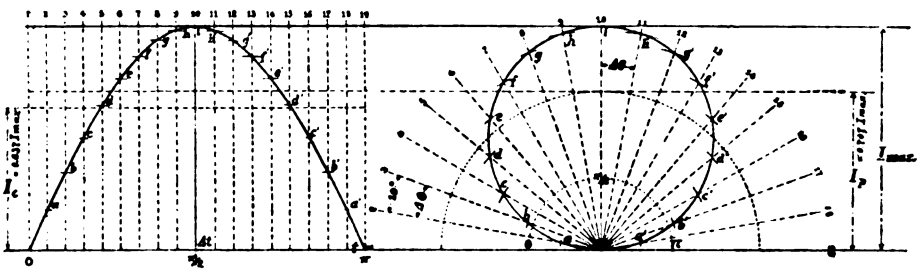


Fig. 1. Fig. 2.

laire de cette même sinusoïde sera égale à la racine carrée de la somme des carrés des ordonnées du graphique cartésien, soit à 0,707 de l'ordonnée maxima (puisque nous aurons toujours

$$I_p = \sqrt{\frac{\Sigma i^2}{t}} = 0.707\ I_{max}).$$

La méthode de Fleming répond admirablement au but particulier pour lequel elle a été imaginée, mais elle ne se prête pas si bien, ou même pas du tout, à la généralité des cas qui se rencontrent dans la pratique. Dans le cas d'un courant alternatif, il suffit de préciser et de mesurer les phénomènes et les effets produits durant un temps très court — une demi-période seulement — puisque la seconde demi-période n'est qu'une répétition de la première en sens (polarité) inverse. Ainsi, puisqu'il est d'usage que le vecteur représentant le courant alternatif, dans un diagramme polaire, fasse un tour complet, c'est-à-dire qu'il décrive un angle vectoriel égal à 2π durant chaque période entière, il s'ensuit que le graphique polaire du Dr. Fleming, lequel se rapporte à une demi-période seulement, n'a besoin de faire qu'un *demi-tour*. Cela simplifie beaucoup l'application de la méthode pour des courants tels que les courants alternatifs, ou bien pour tous courants *périodiques* qui reviennent systématiquement et précisément aux mêmes valeurs au

Digitized by Google

bout d'un temps bien court; mais il n'en est pas ainsi pour les courants variables irréguliers et sans périodes définies. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un diagramme des ampères traversant un feeder, un rhéostat, un moteur à traction ou d'ascenseur, etc., durant un intervalle de temps assez considérable — une, deux ou trois heures. Il ne serait guère possible (dans tous les cas il ne serait pas pratique) de comprimer un tel diagramme dans un graphique polaire d'un demi-tour seulement.

Méthode nouvelle. — La difficulté se détourne assez aisément en donnant plus de généralité et d'étendue à la méthode de Fleming. On peut se rendre compte bien vite du fait qu'il n'est pas du tout nécessaire du s'arrêter à un demi-tour, mais que, au contraire, il n'y a aucune limite au nombre de " tours „ que le rayon vecteur peut faire autour du " pôle „, dans un graphique polaire. En effet, les spirales de toutes sortes sont bien des courbes à coordonnées polaires dont le rayon vecteur peut faire un nombre indéfini de tours autour du pôle.

Le point de départ et le principe de la méthode développée par l'auteur restent les mêmes que pour la méthode Fleming, c'est-à-dire que l'on utilise les propriétés géometriques et analytiques des graphiques à coordonnées polaires. (Ces propriétés sont résumées et comparées avec celles des graphiques cartésiens dans la note *A* annexée à ce mémoire).

Transformation de diagramme. — L'étude détaillée de la transformation d'un diagramme d'ampères à coordonnées cartésiennes fera voir clairement le chemin par lequel l'auteur est arrivé à la grande généralité que possède la méthode nouvelle.

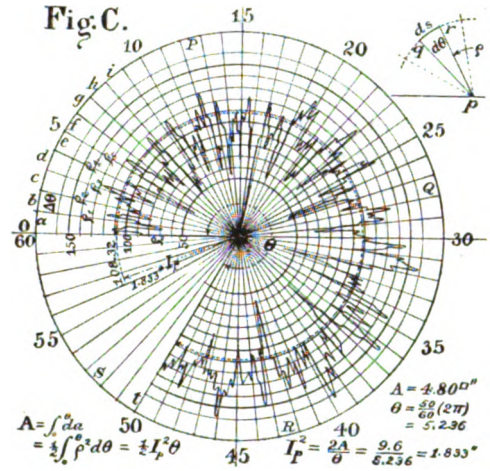
Prenons un graphique (fig. A) à coordonnées cartésiennes, représentant les variations du courant dans un circuit durant un certain intervalle de temps. Pour donner plus de généralité à la méthode, nous supposerons que la courbe, $i = f(t)$, représentée par le graphique, n'est assujettie à aucune restriction sous les rapports de sa longueur (durée de l'expérience) ou des variations du courant. Ainsi, la méthode devra pouvoir s'appliquer même dans les cas jusqu'à présent considérés impraticables, comme, par exemple, le cas d'un diagramme d'ampères de n'im-

Digitized by Google

porte quelle longueur — (même de plusieurs mètres) — obtenu au moyen d'un ampère-mètre enregistreur.

On commence par diviser le diagramme arbitrairement en " tranches „ *a, b, c, d, e*..... de largeur convenable (Δt) en traçant des lignes verticales $y_1\ y_2\ y_3\ y_4\ y_5$ ..... formant un *cloisonnage* régulier entre les tranches. La largeur des tranches, soit l'intervalle

Fig. C.



de temps Δt, peut être quelconque, pourvu qu'elle soit la même pour tout le diagramme. Pour des diagrammes qui sont très " accidentés „ comme celui de la fig. A, on prendra Δt entre 1 et 5 millimètres. Pour les diagrammes de la fig. A les tranches étaient de 3,8 mm. (0,15 pouce). Pour les diagrammes relativement " unis „ (peu dentelés) on peut prendre Δt égal à 10, 15 ou 20 millimètres. Il n'est pas nécessaire que la largeur, Δt, des tranches représente un intervalle de temps exact. Parfois la bande de papier sur laquelle le diagramme des ampères a été tracé est déjà divisée en tranches. Dans ce cas il y aura généralement avantage à utiliser ces divisions.

On procède ensuite à préparer un " blanc „ de diagramme polaire. Sur une ligne horizontale prise comme diamètre (fig. C) on décrit un cercle O P Q R S O de rayon un peu plus grand que la plus longue ordonnée sur le diagramme cartésien des *i* (fig. A). On divise la circonférence de ce cercle en parties égales (a, b, c, d, e....) dont le total, *n*, peut être *quelconque, pair ou impair*. (Il importe de noter ce point). Les rayons $\varrho_1\ \varrho_2\ \varrho_3\ \varrho_4\ \varrho_5$..... ϱ_n forment un cloisonnage entre les tranches triangulaires,

Digitized by Google

c'est-à-dire les secteurs a, b, c, d, e..... chacun desquels correspond à un déplacement angulaire définitif, $\Delta\theta$, du rayon vecteur ρ. L'angle $\Delta\theta$ peut bien être quelconque, mais il est préférable, en pratique, de lui donner une valeur définitive en *degrés*, laquelle peut varier entre 4° et 15°, suivant les cas. Il est alors plus facile de diviser le cercle et de tracer les " cloisons „ entre les secteurs. Après que les cloisons radiaires sont faites, on peut reproduire les subdivisions de l'échelle des ordonnées du graphique cartésien (fig. A). Ainsi, en prenant sur la fig. A la distance $i = 150$ ampères, et en décrivant un cercle de rayon égal à cette distance sur la fig. C, nous aurons la même échelle. On décrit de la même manière les cercles correspondant à 50, 60, 70..... 140. Il n'est pas nécessaire de décrire les cercles correspondant à 10, 20, 30, 40, puisque le diagramme cartésien (fig. A) ne comporte que peu ou pas de variations au-dessous de 50 ampères.

Il importe de noter que l'échelle des ordonnées peut bien être augmentée ou diminuée, au lieu d'être la même que sur le diagramme cartésien. En général, cependant, il vaut mieux retenir la même échelle, parce que le report ou transfert des ordonnées du diagramme cartésien sur le diagramme polaire peut alors se faire beaucoup plus facilement et plus vite.

Pour transformer le graphique cartésien en un graphique polaire, on procédera par tranches, en commençant par la première. A l'aide d'un compas on reportera la première ordonnée, y_0, du graphique cartésien, sur la ligne horizontale, 0-30 (fig. C), ce qui donnera le rayon vecteur ρ_0. Si les échelles sont les mêmes sur les deux diagrammes, le transfert se fera directement. Si les échelles sont différentes, il faudra faire intervenir un coefficient de proportionnalité. On reportera, de même manière, sur les rayons vecteurs $\rho_1\ \rho_2\ \rho_3\ \rho_4\ \rho_5$ ..... etc. du graphique polaire (fig. C) les ordonnées $y_1 y_2 y_3 y_4 y_5$ ..... etc. correspondantes du graphique cartésien (fig. A). Lorsque le graphique cartésien est très accidenté à certains points, il y aura avantage à subdiviser les tranches affectées, en deux, trois, quatre ou cinq parties égales et à subdiviser semblablement l'angle, $\Delta\theta$, des tranches ou secteurs polaires correspondants. Avec un peu d'exercice, le transfert des ordonnées du diagramme cartésien au diagramme polaire se fait, même sans compas, et assez vite, en prenant les cercles d'*échelle* comme lignes de repère. Quand tout le diagramme cartésien aura été transposé, il y aura le

Digitized by Google

même nombre de tranches sur les deux diagrammes. Ainsi, puisque le nombre de tranches est de 50 pour le diagramme cartésien de la fig. A, le nombre de tranches *remplies* dans le diagramme polaire correspondant (fig. C) sera aussi de 50. Si, par hasard, le diagramme cartésien ne remplissait qu'une partie de la dernière tranche, le diagramme polaire correspondant ne remplirait aussi que la même proportion de sa dernière tranche.

Théorie. — La condition nécessaire et suffisante pour que la transformation soit complète est la suivante: il faut que nous ayons toujours

$$f(n\,\Delta t) = f(n\,\Delta\theta)$$

pour toutes valeurs de n comprises entre $n = o$ et $n = \frac{t}{\Delta t}$, quand t est la longueur totale du diagramme cartésien.

Cela veut dire que l'ordonnée (y) du graphique cartésien située à une distance linéaire *quelconque* de l'origine, et représentée par $n\,\Delta t$, doit toujours être égale au rayon vecteur (ϱ) du graphique polaire situé à une distance *angulaire* proportionnelle, représentée par $n\,\Delta\theta$.

Cette condition est indépendante des valeurs attribuées à Δt ou à $\Delta\theta$, lesquelles n'influent que sur l'étendue, soit sur la " longueur „ (linéaire ou angulaire) du graphique, soit sur le format et l'échelle du graphique.

Il faut maintenant trouver la relation analytique qui repose sur les propriétés du graphique polaire que nous voulons utiliser.

L'aire, *da*, correspondant à un élément de courbe polaire $p\,q\,r$ (fig. C), est égale à

$$da = \frac{1}{2}\varrho\,ds = \frac{1}{2}\varrho^2 d\theta$$

ϱ étant le rayon vecteur, $d\theta$ l'angle vectoriel, et $ds = \varrho\,d\theta$ un élément de courbe quelconque.

L'aire totale, A, pour un diagramme dont l'angle vectoriel entier est égal à $\theta = \varphi^1 - \varphi$, est égale à

$$A = \int_o^\theta da = \frac{1}{2}\int_o^\theta \varrho^2 d\theta\,. \qquad (A)$$

Cette aire peut s'obtenir d'après le graphique même, par un

Digitized by Google

procédé d'intégration graphique ou mécanique. Dans la pratique on l'obtient par l'emploi d'un planimètre ou d'un intégraphe.

Pour tout graphique polaire, comme pour tout graphique cartésien, il y a une aire " *équivalente* „ qui correspond à une certaine ordonnée constante appelée *ordonnée moyenne*. Avec cette ordonnée moyenne on peut construire un diagramme d'aire équivalente. Ce diagramme équivalent a la forme d'un rectangle, en coordonnées cartésiennes, et d'un secteur de cercle, en coordonnées polaires.

En appelant I_p cette ordonnée moyenne, nous aurons, pour l'aire d'un secteur dont l'angle vectoriel est égal à θ, la valeur suivante:

$$A = \frac{I_p^2 \theta}{2} . \qquad (A')$$

En introduisant cette valeur dans l'équation (*A*), il vient

$$\frac{I_p^2 \theta}{2} = \frac{1}{2} \int_o^\theta \rho^2 d\theta , \qquad (B)$$

d'où nous tirons

$$I_p = \sqrt{\frac{1}{\theta} \int_o^\theta \rho^2 d\theta} . \qquad (C)$$

Si nous comparons l'équation (*C*) avec l'équation (*f*) déjà trouvée, nous voyons qu'elles ont précisément la même forme. En effet, ces deux équations, dont l'une (*f*) se rapporte à un diagramme cartésien et l'autre (*C*) à un diagramme polaire, résument et exposent deux manières différentes d'obtenir le même résultat. En supposant, maintenant, qu'elles aient trait toutes deux au même cas, nous pourrons poser

$$I = I_p$$

et, par conséquent,

$$\sqrt{\frac{1}{t} \int_o^t i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\theta} \int_o^\theta \rho^2 d\theta} . \qquad (D)$$

La distinction bien importante entre ces deux manières d'arriver au but désiré, et qu'il importe bien de noter, est la sui-

Digitized by Google

vante: tandis que l'expression (*C*), à la droite de l'équation (*D*), représente bien l'ordonnée moyenne d'un graphique polaire, l'expression (*f*), à gauche, ne représente pas l'ordonnée moyenne du graphique cartésien des carrés de la même fonction, mais elle représente la *racine carrée* de cette ordonnée. En effet l'ordonnée moyenne (I^2) du graphique cartésien des carrés (i^2) se représente, non pas par l'équation (*f*), mais bien par l'équation (*e*). On s'en rend compte bien vite en portant chaque membre de l'équation (*D*) au carré, ce qui nous donne

$$\frac{1}{t}\int_o^t i^2 dt = \frac{1}{\Theta}\int_o^\Theta \varrho^2 d\Theta .$$

Ici, nous retrouvons, à gauche, l'expression (*e*), de sorte que, en substituant, nous avons

$$I^2 = \frac{1}{\Theta}\int_o^\Theta \varrho^2 d\Theta . \qquad (E)$$

A gauche, I^2 représente l'ordonnée moyenne du graphique cartésien des carrés (i^2) d'une fonction (*i*). A droite, nous avons bien l'équivalent de I_p^2, ainsi qu'on peut voir d'après l'équation (*B*). Or, I_p^2 est le *carré* de l'ordonnée moyenne du graphique polaire. On voit donc que: *l'ordonnée moyenne du graphique cartésien des carrés d'une fonction est égale au carré de l'ordonnée moyenne du graphique polaire de la fonction.*

Cette relation peut s'exprimer inversement comme suit: *L'ordonnée moyenne du graphique polaire d'une fonction, soit le rayon d'un secteur du même angle vectoriel et de la même aire que ce graphique, est égale à la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des ordonnées de la fonction représentée par ce graphique ou par le graphique cartésien correspondant.*

Un point important est à noter. La valeur de *t* dans l'expression (*f*) peut être *quelconque*. Le diagramme cartésien peut donc avoir une longueur et une échelle quelconques. La valeur de Θ dans l'expression (*C*) peut également être quelconque. Le rayon vecteur (ϱ) peut donc faire un nombre indéfini de " tours „ autour du " pôle „. Si l'angle vectoriel du secteur est moins de $\Theta = 2\pi$, le rayon vecteur fera moins d'un tour (fig. C). Si cet angle est égal à $\Theta = 2{,}5\,\pi$, le rayon vecteur fera un tour et un quart; et le " secteur „ vectoriel se composera alors d'un cercle entier et d'un quart de cercle. Pour un angle vectoriel de

Digitized by Google

$\theta = 10{,}4\,\pi$, le rayon vecteur ferait cinq tours et deux dixièmes; et le " secteur „ vectoriel se composerait de cinq cercles entiers et d'un secteur d'angle égal à $\theta = 0{,}4\,\pi$, soit 72°.

Plus le diagramme cartésien sera long, plus le diagramme polaire correspondant aura à faire de " *tours* „ autour du " pôle „. Le diagramme polaire ne serait pas facile à construire ou à utiliser s'il fallait que tous les tours se fassent autour d'un seul et même *point* ou *pôle*. Heureusement que cela n'est pas nécessaire. On peut établir un pôle distinct pour chaque tour (figs. 4 et 8). C'est ainsi que l'auteur a pu donner à sa méthode une portée extraordinaire d'application pratique.

Si l'on remplace, dans l'équation (*E*), l'expression à droite par sa valeur, tirée de l'équation (*A'*), nous aurons

$$I^2 = \frac{2A}{\theta}.$$

On peut tirer de l'équation (*A'*) elle-même un résultat analogue, soit

$$I_p^2 = \frac{2A}{\theta}. \qquad (G)$$

En prenant la racine carrée, nous aurons

$$I_p = \sqrt{\frac{2A}{\theta}}. \qquad (H)$$

Cette équation indique un procédé pratique pour trouver la valeur de I_p, l'ordonnée moyenne (rayon moyen) du graphique polaire.

L'aire (A) du graphique polaire s'obtient facilement par procédé planimétrique. La valeur de θ, l'angle vectoriel, sera égale numériquement (c'est-à-dire en *radians*) à autant de fois 2π que le rayon vecteur aura fait de *tours* autour du *pôle*. Ainsi, un diagramme polaire comme celui de la fig. C, où il reste 10 tranches vides sur 60, ne fait que les $\frac{50}{60}$ d'un seul tour; donc nous avons

$$\theta = \frac{50}{60} \times 2\pi = 5{,}236 \text{ (\textit{radians})}.$$

Digitized by Google

Le graphique polaire de la fig. 4 comporte 15,6 tours; donc son angle vectoriel est égal à

$$\theta = 15{,}6 \times 2\pi = 31{,}2\pi = 98{,}018 \text{ (\textit{radians})}.$$

Applications pratiques. — Pour faire usage de la méthode nouvelle il faut, comme pour la méthode ordinaire, avoir un diagramme des ampères analogue à celui de la fig. A, qui est la reproduction d'une partie d'un diagramme des ampères traversant un feeder, relevé à l'ampèremètre enregistreur. Ce cas particulier a été traité exprès par l'ancienne et par la nouvelle méthode dans le but de comparer ces méthodes. La fig. B représente l'application de l'ancienne méthode. C'est le diagramme des carrés des ampères (i^2) dont le procédé de construction laborieux a déjà été décrit. Il est remplacé, dans la nouvelle méthode, par le diagramme polaire des ampères de la fig. C, lequel est, comme il a été dit, de construction bien plus facile. Ces deux diagrammes ont le même nombre de tranches (50) que le diagramme des ampères; et ces tranches correspondent aux mêmes intervalles de temps dans les trois diagrammes. On a dû, pour chaque diagramme, trouver l'ordonnée moyenne, par un procédé de planimétrie.

Le calcul de l'ordonnée moyenne du diagramme cartésien des *ampères carrés* a déjà été rapporté, comme exemple de la méthode ordinaire.

Pour le diagramme cartésien des *ampères* (fig. A), l'aire, mesurée au planimètre, étant de 9,88 unités de surface, et la longueur totale du diagramme étant de 7,5 unités de longueur, l'ordonnée moyenne était de $\frac{9{,}88}{7{,}5} = 1{,}318$ unités de longueur; et, puisque, d'après l'échelle adoptée pour les ampères, l'unité de longueur correspondait à 80 ampères, il s'ensuivait que nous devions avoir

$$I_c = 1{,}318 \times 80 = 105{,}4 \textit{ ampères}.$$

Cette valeur est celle de la vraie moyenne " arithmétique „ du graphique cartésien (fig. A).

Pour le diagramme *polaire* des *ampères* (fig. C), l'aire, mesurée au planimètre, était de 4,8 unités de surface, et l'angle vectoriel total était égal à

Digitized by Google

$$\theta = \frac{50}{60} \times 2\pi = 5{,}236 \text{ (}radians\text{)}.$$

La formule (*G*),

$$I^2_p = \frac{2A}{\theta} = \frac{9{,}6}{5{,}236} = 1{,}833 \text{ unités de longueur,}$$

donne le carré de l'ordonnée moyenne I_p laquelle est égale à

$$I_p = \sqrt{1{,}883} = 1{,}354 \text{ unités de longueur.}$$

L'échelle des ampères étant la même que pour la fig. A, nous avons

$$I_p = 1{,}354 \times 80 = 108{,}32 \textit{ ampères},$$

c'est-à-dire que le courant " efficace „ produisant un même échauffement est supérieur à la valeur moyenne arithmétique, de

$$108{,}32 - 105{,}4 = 2{,}92 \textit{ ampères}.$$

En décrivant, sur le diagramme de la fig. C, un secteur (indiqué en pointillé) dont le rayon est égal à 1,833 unités et dont l'angle vectoriel est égal à θ, nous avons, d'après l'échelle des ampères, l'ordonnée moyenne (I_p) représentant un courant de 108,32 ampères. D'autre part, en mesurant ce même secteur au planimètre, nous retrouvons précisément la même aire que celle du graphique polaire des ampères. Ce chiffre (108,32 ampères) s'accorde très bien avec celui trouvé par l'ancienne méthode (fig. B), soit

$$I = \sqrt{I^2} = \sqrt{11{,}720} = 108{,}26 \textit{ ampères}.$$

Il importe de noter, cependant, que pour arriver à cet accord assez remarquable il a fallu des soins et des précautions extraordinaires, non seulement pour construire le diagramme des i^2 de la fig. B, mais aussi pour en mesurer l'aire au planimètre. Même lorsque la précision des résultats n'a pas grande importance, la méthode ordinaire exige cinq ou six foix autant de temps que la méthode nouvelle. Si l'on recherche la précision, la comparaison devient encore bien plus favorable à la méthode nouvelle. L'auteur a souvent fait en une heure par cette méthode

Digitized by Google

ce qu'il n'aurait guère pu faire en un jour entier par l'ancienne méthode.

Le cas particulier que nous venons de considérer, et qui a servi en même temps comme illustration et comme un premier exemple pratique d'application de la méthode nouvelle, est relativement simple. Nous allons maintenant passer à des exemples qui feront ressortir les avantages et la portée extraordinaires de cette méthode. Les figures 3 et 7 répresentent deux diagrammes cartésiens d'ampères qui sont des reproductions de diagrammes très longs relevés à l'ampèremètre enregistreur sur des trains électriques du réseau souterrain (" Subway „) de New York. Ces diagrammes indiquent les régimes du courant à tout instant, dans un des moteurs électriques d'un train composé de cinq voitures, durant un parcours d'aller et retour entre la 145^{ième} rue et l'Hôtel de Ville (City Hall). La fig. 3 se rapporte à un train " omnibus „ (" local „ train) qui s'arrête à toutes les stations. Le parcours a duré 78 minutes. L'original de ce diagramme est un rouleau de papier d'environ 14 mètres (46 pieds) de longueur. La fig. 7 se rapporte à un train " express „ qui ne s'arrête qu'aux stations d'" express „. Le parcours a duré 58 minutes. L'original de ce diagramme est un rouleau de papier d'environ 11,3 mètres (37 pieds) de longueur.

La détermination de la valeur " efficace „ du courant devient, pour de tels cas, une tâche tellement formidable, par la méthode ordinaire (fig. B), qu'elle n'a été faite que bien rarement. Nous allons voir que la méthode nouvelle peut faire ces tours de force avec une facilité presque banale.

Il fallait d'abord, comme auparavant, transformer les diagrammes cartésiens en diagrammes polaires des ampères. A cette fin on a dû choisir une largeur de " tranche „ convenable. Il y avait, sur l'original de chaque diagramme, une marque indicatrice du temps, à toutes les cinq secondes, faite par l'appareil enregistreur. On profita de cette circonstance; on prit $\Delta t = 5$ secondes, de sorte que le sectionnement du diagramme se trouvait déjà tout fait par les marques chronométriques. Ces marques, qui sont reproduites dans les figures 3 et 7, donnent donc 12 tranches par minute ($5 \times 12 = 60$). Par conséquent le diagramme cartésien de la fig. 3, qui représente un intervalle de 78 minutes, doit avoir $78 \times 12 = 936$ tranches; et le diagramme de la fig. 7, qui représente un intervalle de 58 minutes, doit avoir $58 \times 12 = 696$ tranches. Le diagramme polaire correspondant à chaque

Digitized by Google

diagramme cartésien devra avoir le même nombre total de tranches, lesquelles sont *triangulaires*. Puisqu' il serait impossible de mettre tant de tranches dans un seul " tour „, il faut prévoir un diagramme polaire de plusieurs tours. Toutefois, s'il fallait, de nouveau, sectionner un cercle, et préparer un " blanc „ de diagramme polaire, comme celui de la fig. 5, par exemple, pour chaque tour que le diagramme polaire doit faire,

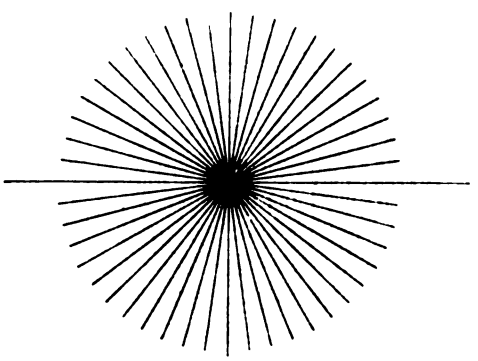


Fig. 5.

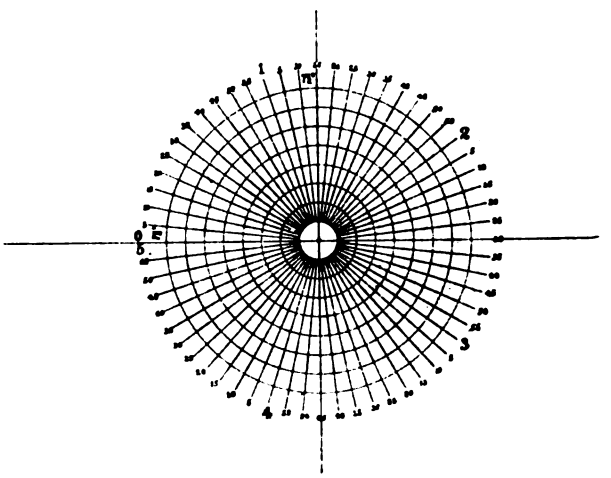


Fig. 6.

le travail de transformation pourrait devenir considérable. Heureusement que cela n'est pas du tout nécessaire. On peut faire usage d'un seul et même " blanc „ pour tous les tours. Ce blanc est préparé en sectionnant un disque au moyen de lignes radiaires équi-angulaires, tout comme s'il s'agissait de construire un " rapporteur „. Le blanc de la fig. 5 a 48 tranches ou secteurs de 7,5 degrés chacun. Le blanc de la fig. 6 a 60 tranches de 6° chacune. Un " blanc „ ou disque de diagramme polaire comme celui employé pour le diagramme de la fig. C, comprenant 60 tranches ou secteurs, chacun de 6° (fig. 6), a été choisi en définitif, après quelques essais préalables faits avec des blancs de 48, 72 et 84 secteurs. Il y avait intérêt à choisir un nombre de secteurs qui fût multiple de 12. Puisque chaque tranche cartésienne représentait un intervalle de 5 secondes, un secteur de 12 tranches représenterait juste une minute. Chaque " tour „ du diagramme polaire correspondrait donc à 4 minutes pour un disque de 48 secteurs, à 5 minutes pour un disque de 60

Digitized by Google

secteurs, à 6 minutes pour un disque de 72 secteurs, etc. Le secteur à 60 tranches, choisi pour le cas actuel, correspond donc à un intervalle de 5 minutes par *tour*. En divisant le nombre de tranches du diagramme cartésien par 60, le nombre de secteurs du disque choisi, nous obtenons le nombre de " *tours* „ qu'il faudra faire faire au diagramme polaire correspondant pour faire place à toutes les tranches. Ainsi, le diagramme polaire (fig. 4), correspondant à la figure 3, devra avoir $\frac{936}{60} = 15{,}6$ tours; son angle vectoriel total sera

$$\theta = 15{,}6 \times 2\pi = 31{,}2\pi = 98{,}018 \text{ (radians)};$$

et le diagramme polaire (fig. 8) correspondant à la figure 7 devra avoir $\frac{696}{60} = 11{,}6$ tours; son angle vectoriel total sera

$$\theta = 11{,}6 = 2\pi = 23{,}2\pi = 72{,}885 \text{ (radians)}.$$

Les fig. 4 et 8 représentent les diagrammes polaires correspondant aux diagrammes cartésiens des figs. 3 et 7. Pour faire ces diagrammes on se sert de papier ou de toile à calquer au lieu de papier à dessin ordinaire. On peut alors utiliser, pour tous les " tours „ du diagramme polaire, un seul et même disque ou " blanc „ à secteurs (fig. 6), qui sera fait sur une feuille séparée et que l'on placera où l'on voudra sous la toile ou le papier à calquer.

Les cercles concentriques, sur la fig. 6, correspondent, de rayon, aux ordonnées des lignes parallèles sur les figs. 3 et 7, et servent à indiquer la même échelle des ampères.

On commence par tracer, sur la feuille, au crayon, une ligne horizontale. On place ensuite le " blanc „ à secteurs sous le calque et on l'aligne de manière à ce que son diamètre horizontal coïncide parfaitement avec la ligne horizontale tracée sur le calque. On voit alors les secteurs à travers le calque tout comme si les lignes radiaires étaient tracées sur le calque lui-même. On peut donc procéder de suite à reporter, sur chaque tranche ou secteur, les ordonnées prises sur le secteur correspondant du graphique cartésien. Le procédé est précisément celui qui a été décrit pour le diagramme polaire de la fig. C. Il n'est pas du tout nécessaire de tracer les lignes radiaires sur le calque. Elles y ont été tracées, dans les cas représentés par

Digitized by Google

les figs. 4 et 8, à la seule fin de rendre les illustrations plus complètes et intelligibles pour les novices. Elles fourniront des lignes de repère utiles à ceux qui voudront étudier en détail la transformation des graphiques cartésiens en graphiques polaires. En pratique, on se dispensera généralement de tracer les lignes radiaires qui sont en pointillé dans les figures. Il peut être utile, cependant, de tracer les lignes radiaires qui correspondent aux minutes.

On voit que, dans le cours de 5 minutes après le départ, le moteur a reçu du courant à trois reprises distinctes (I, II, III). Dans les 60 tranches correspondant à cet intervalle de temps, c'est-à-dire durant le premier tour, il y aura donc trois diagrammes polaires distincts (I, II, III).

Après avoir fini le premier tour on déplacera le blanc à droite sur la ligne horizontale; on l'alignera de nouveau; et on procédera, de la même manière, à reporter les ordonnées des diagrammes d'ampères qui se trouvent sur les 60 tranches suivantes du diagramme cartésien, soit dans l'intervalle compris entre 5 et 10 minutes après le départ du train. On procédera de la même manière, successivement, pour chaque série de 60 tranches, laquelle correspondra à un tour complet du graphique polaire et aussi à un intervalle de 5 minutes. Puisque, d'après le calcul basé sur le nombre total de tranches cartésiennes à reporter et à transformer en tranches polaires, le nombre de tours nécessaire sera de 15,6, il aurait fallu une feuille bien longue pour mettre tous les tours en une seule rangée. On a donc tracé une seconde ligne horizontale à une certaine distance sous la première et on a fait deux rangées, la première de huit tours, la seconde de 7,6 tours.

On voit, d'après le graphique cartésien (fig. 3), que le moteur électrique a reçu du courant à 60 reprises durant le parcours complet du train. Chaque " étape „ représentée par un diagramme cartésien distinct sur la fig. 3 sera également représentée par un diagramme polaire distinct sur la fig. 4. La même étape est désignée par le même chiffre romain sur les deux graphiques, ce qui permet de les retrouver et de les comparer facilement.

Nous constatons, sur le graphique cartésien, que l'étape no. VI n'était pas finie au bout de la 10-ième minute, c'est-à-dire au bout du deuxième " tour „ du graphique polaire. En conséquence, le graphique polaire de cette étape sera en deux par-

Digitized by Google

ties. Ce qui se passe durant la 10-ième minute sera reporté sur la dernière partie du second tour. Ce qui se passe durant la 11-ième minute sera reporté sur le troisième tour. Il en est de même de l'étape no. X, laquelle, n'étant pas finie au bout de la 15-ième minute, c'est-à-dire à la fin du troisième tour, se complète au commencement du quatrième tour, durant la 16-ème minute. Le même fait se reproduit encore pour les étapes suivantes; les nos. XIV, XVIII, XLIII, LVIII.

Après avoir complété le graphique polaire, il faut en trouver l'aire totale, par un procédé quelconque de planimétrie. L'instrument le mieux connu et le plus souvent utilisé pour de telles mesures est le planimètre; mais il y a un autre instrument, l'intégraphe, qui mérite d'être beaucoup mieux connu et répandu, en raison du grand avantage qu'il a de tracer la courbe intégrale et de donner graphiquement un compte-rendu détaillé d'une intégration, entre n'importe quelles limites, intermédiaires ou subsidiaires, tandis que le planimètre ne donne que le résultat numérique final de l'intégration d'une aire.

Les calculs ont été faits des deux manières pour le graphique de la fig. 4, c'est-à-dire en utilisant le planimètre et l'intégraphe. Nous allons voir que l'emploi de l'intégraphe présente içi un intérêt spécial, non seulement parce qu'il simplifie le travail, mais aussi parce qu'il fournit incidemment un moyen bien simple et bien sûr de contrôler la précision du résultat.

Quand on emploie un planimètre ordinaire il est préférable de faire la mésure pour chaque " étape „ séparément. Les planimètres polaires du type ordinaire ne sont pas si commodes pour ces mesures que les planimètres *roulants*, comme, par example, le planimètre roulant de haute précision de la Maison G. Coradi de Zurich. Ce dernier a le grand avantage de pouvoir passer sur toute une rangée de tours du graphique polaire sans que l'on ait à le replacer. Le planimètre ordinaire doit, on le sait. déménager plusieurs fois, car il faut que son pôle soit placé spécialement et convenablement pour chaque disque. Il est d'usage de faire la même mesure plusieurs fois et de prendre la moyenne de toutes les mesures. Cette moyenne est notée en chiffres, pour chaque étape, sur le diagramme (fig. 4).

On sait qu'il faut un certain temps et du soin pour faire la lecture du cadran indicateur d'un planimètre avant et après chaque intégration. Aussi, pour l'intégration, faite séparément, de chaque étape, sur la fig. 4, et pour la répéter deux fois, il a fallu faire un

Digitized by Google

total d'environ 200 lectures au moins. Avec le planimètre roulant on peut, si l'on veut, faire toute une " rangée „ de tours polaires d'un seul coup, et même, en répétant trois fois, il faudrait guère 20 lectures.

Quand on emploie un intégraphe, on le dispose sur le calque de manière à ce que son traçoir, quand il est à la position " nulle „, suive exactement la ligne horizontale qui passe par le milieu d'une rangée. On fait alors tracer, par l'intégraphe lui-même, en le laissant rouler sur le calque, une ligne d'axe, telle que OX. On procède ensuite à suivre le contour du graphique avec le traçoir de l'intégraphe, comme on ferait avec le traçoir d'un planimètre, en partant toujours du *pôle* et en y revenant toujours, à la fin, pour chaque " disque „. Après avoir fini de contourner le premier disque on passe directement de son pôle au pôle du second disque, en suivant la ligne horizontale qui les relie. Après avoir coutourné, de la même manière, le graphique polaire du second disque, on passe au troisième, toujours en suivant la ligne horizontale pour aller d'un pôle à l'autre. On procède de la même manière jusqu'à ce que l'on soit arrivé au dernier disque et que l'on l'ait contourné. Pendant que le traçoir de l'intégraphe contourne un des graphiques polaires, l'appareil décrira une courbe " intégrale „, laquelle sera plus ou moins compliquée suivant la forme et la " dentelure „ du graphique polaire. A la fin de l'intégration de chaque graphique et pendant que le traçoir passe sur la ligne horizontale pour arriver au pôle du disque suivant, l'appareil tracera lui-même une ligne *horizontale*, située à une certaine distance de la ligne d'axe OX, laquelle distance sera proportionnelle à l'*aire* du graphique polaire. Ainsi, dans la fig. 4, la ligne horizontale 5-A a été tracée après que l'intégration du graphique polaire sur le premier disque fût finie. La distance entre la ligne d'axe OX et la ligne 5-A est proportionnelle à l'aire totale des trois " étapes „ sur le premier disque. En la mesurant à l'échelle pour laquelle l'intégraphe a été ajusté, on trouve 1,772 unités, soit le total des trois aires mesurées séparément. La ligne 5-A sert de ligne d'axe pour l'intégration du second disque. De même manière, la ligne 10-B, qui donne la valeur de l'intégration du deuxième disque (soit $3{,}307 = 1{,}772 + 1{,}535$), sert de ligne d'axe pour l'intégration du troisième disque. Il en est de même pour toutes les autres lignes horizontales, 20-D, 25-E, 30-F, 35-G, n. 40-H. La distance A-10, mesurée à l'échelle adoptée, donne 1,535, ce

Digitized by Google

qui est égal à la somme des trois étapes (IV, V, VI) représentées sur le deuxième disque. De même manière, les distances B-15, C-20, etc., mesurées à l'échelle, donnent l'aire totale du graphique polaire sur le disque correspondant. Il est évident que la distance *au-dessous* d'une ligne horizontale quelconque, comme, par exemple, la distance au-dessus de la ligne 30-F, est la mesure de l'aire totale de tous les disques qui précèdent. Ainsi, la distance de la ligne OX à la ligne 30-F, mesurée à l'échelle, est égale à l'aire des six premiers disques. La distance XH = Y, c'est-à-dire l'ordonnée dernière (Y) de la courbe intégrale, représente l'aire totale de la première rangée, soit 12,508 unités de surface.

La courbe intégrale pour la seconde rangée des disques est obtenue exactement de la même manière que celle de la première rangée, en partant également d'une ligne d'axe, O'X'. L'ordonnée finale de cette courbe intégrale, soit Y' = X'P, représente l'aire totale de la deuxième rangée. La somme de ces deux aires est égale à 28,613 unités de surface, ainsi que l'on voit par l'échelle S. Ce total est précisément le même que le total de toutes les aires obtenues au planimètre et notées sur le diagramme.

Pour obtenir la valeur efficace on se sert, comme pour le cas de la fig. C, de la formule (G).

Nous aurons

$$I_p^2 = \frac{2 + 28{,}613}{31{,}2\pi} = \frac{57{,}226}{98{,}018} = 0{,}5836 \text{ unité de surface}$$

et

$$I_p = \sqrt{I_p^2} = \sqrt{0{,}5836} = 0{,}764 \text{ unité de longueur.}$$

L'échelle M, à la droite de la fig. 4, est la même que l'échelle des ampères sur le graphique cartésien.

L'étalonnage de l'ampère-mètre enregistreur a indiqué que la valeur précise en ampères était de 1" = 206,4 ampères. Par conséquent pour 0,764 de 1" nous aurons

$$I_p = 0{,}764 \times 206{,}4 = 157{,}69 \text{ ampères.}$$

Le courant " efficace „ d'échauffement durant l'intervalle de 78 minutes que le parcours du train omnibus à duré était donc de 157,69 ampères.

Digitized by Google

Nous allons maintenant contrôler cette valeur. Le petit cercle *p q r s* à la droite de la fig. 4, a été décrit aussi exactement que possible de rayon R = 0,764". La ligne radiaire O-*t* est parallèle à la dernière ligne radiaire (78) du dernier disque polaire. Au moyen de l'intégraphe on a obtenu la courbe intégrale U d'un " secteur „ qui fait 15,6 tours autour du pôle et dont l'angle vectoriel total est égal à $\theta = 31{,}2\pi$. Cette courbe, qui est en zigzag, a une ordonnée finale qui est exactement égale à la valeur déjà trouvée, à l'échelle S, pour l'aire totale de tous les disques du graphique polaire. Elle indique bien clairement le fait que l'aire " équivalente „ qu'elle représente se compose de 15 cercles entiers et de 0,6 de cercle. Ainsi, après la première intégration du cercle *p q r s* l'ordonnée de U au point qui correspond à $\theta = 2\pi$, donne une aire égale à 1,834 unités de surface. Après le deuxième tour autour du cercle *p q r s* nous avons, au point 4π, le double; après le quinzième tour, au point 30π, nous avons $1{,}834 \times 15 = 27{,}51$ unités de surface. Au seizième tour, qui n'est que partiel, nous trouvons 1,10 unités de surface, ce qui fait un total de $27{,}51 + 1{,}10 = 28{,}62$ unités de surface.

Il est bien vrai que le contrôle du résultat peut se faire également en intégrant le même cercle *p q r s* au moyen d'un planimètre. Mais l'intégraphe a l'avantage de fournir une indication graphique de la marche du procédé, qui constitue en même temps une démonstration oculaire de l'équivalence de l'aire.

Pour la fig. 8, les dispositions et le procédé ont été variés. Les " disques „ sont ici disposés en deux rangées rapprochées l'une de l'autre, et la seconde est placée *au-dessus* de la première. Cette disposition a un certain avantage, parce qu'elle permet de faire l'intégration des deux rangées (ou même de trois ou quatre rangées) sans avoir à déranger ou à replacer l'intégraphe. Après que l'intégration des disques polaires de la première rangée est finie et que la ligne d'ordonnée finale (30-X') a été tracée on n'a qu'à la prolonger à gauche, jusqu'à O' en faisant revenir l'intégraphe à l'extrême gauche, pour qu'elle devienne une nouvelle ligne d'axe (O' X'), qui servira pour la seconde rangée. Les lignes accessoires (pour les dimensions et séparations) ont été omises sur la fig. 8, pour donner plus de relief à la courbe intégrale. On a utilisé la courbe intégrale elle-même d'une toute autre façon que pour le cas de la fig. 4. Dans la fig. 4, l'auteur a dû ajuster et étalonner les deux instruments, le planimètre et l'intégraphe, avec le plus grand soin, afin d'ob-

Digitized by Google

tenir un accord et une coïncidence parfaite des valeurs obtenues pour les aires. Il fallait cette précision pour que la démonstration fût plus évidente et plus satisfaisante. En pratique, il n'y a aucune nécessité d'ajustage ou d'étalonnage précis. Dans la fig. 8, l'auteur a voulu démontrer que l'on peut arriver à un résultat tout-à-fait précis même sans fixer aucune échelle.

On peut changer le coefficient de proportionnalité ou le *facteur d'échelle* d'un intégraphe comme celui d'un planimètre, par un ajustement préalable.

Cette fois, au lieu de chercher à prendre la même échelle que celle du planimètre, pour l'intégraphe, on a fait exprès pour prendre une autre échelle, n'ayant aucun rapport défini à l'échelle du planimètre. On n'a pas même pris la peine de noter le coefficient ou facteur de cette échelle. L'ordonnée finale de la courbe intégrale, soit $U = X + Y'$, ne pouvait donc pas être mesurée par aucune échelle. Pour trouver la valeur R du rayon du " secteur „ équivalent, on a procédé tout simplement par " tâtonnement „. Ayant décrit un cercle quelconque, on fait, à l'intégraphe, une courbe intégrale correspondant à l'angle vectoriel total voulu, soit, pour le cas actuel, à

$$\theta = 23{,}2\pi.$$

L'ordonnée finale de cette courbe intégrale sera plus grande que l'ordonnée U si le rayon choisi était trop grand; et, au contraire, elle sera plus petite si ce rayon était trop petit. On effacera alors le cercle et on en décrira un autre un peu plus petit ou plus grand, suivant le cas, et on en fera l'intégration comme auparavant. Après deux ou trois tentatives, rarement plus de quatre ou cinq, on aura trouvé le rayon R du secteur équivalent; et la courbe intégrale de ce secteur aura une ordonnée finale égale à U. La valeur R, lue à l'échelle des ampères, sera elle-même la vraie valeur du courant " efficace „ qu'il fallait trouver.

Les données obtenues au planimètre, pour le même cas (fig. 8), permettent de contrôler la valeur trouvée graphiquement pour le rayon R. En effectuant les calculs, de la manière déjà indiquée, on a trouvé $R = 0{,}631$. Or, la valeur trouvée *graphiquement* à l'aide de l'intégraphe était tellement rapprochée de cette valeur que les cercles correspondants se confondaient, la différence de rayon étant moindre que la largeur de la ligne du cercle $p\ q\ r\ s$

Digitized by Google

sur la fig. 8, de sorte que le second cercle ne faisait qu'élargir légèrement la ligne du premier cercle.

L'étalonnage de l'ampère-mètre enregistreur étant le même que pour la fig. 4, il résulte que le courant " efficace „ est égal à

$$I_p = 0{,}631 \times 206{,}4 = 130{,}24 \text{ ampères.}$$

Le courant efficace dans le cas du train express n'était donc que de 82 $^1/_2$ pour cent du courant effectif dans le cas du train omnibus.

La méthode " à tâtonnement „ (en réalité, une méthode de " substitution „), qui vient d'être décrite, peut aussi se pratiquer en faisant usage d'un planimètre, et sans se préoccuper de déterminer précisément son " facteur d'échelle „. L'auteur a constaté, cependant, que pour ceux qui ont les deux à leur disposition, l'intégraphe a toujours la préférence.

En raison du fait que l'intégraphe trace la courbe intégrale complètement, il dispense de toutes lectures de cadrants, d'échelles, etc. Il lui faut moins de temps pour tracer la courbe intégrale trois fois qu'il ne faut pour mesurer l'aire totale une seule fois au planimètre. La courbe intégrale permet de vérifier et de contrôler l'opération à chaque pas. Ainsi, on peut voir bien vite si une partie quelconque du diagramme polaire a été *oubliée* ou bien intégrée deux fois, ce qui arrive parfois avec le planimètre, et sans qu'on s'en aperçoive. On peut donc, à tout compter, faire une détermination donnée beaucoup plus vite et avec plus de précision avec l'intégraphe qu'avec le planimètre.

Digitized by Google

NOTE *A*.

Comparaison des particularités géométriques et analytiques des graphiques à coordonnées cartésiennes et polaires.

Graphiques à coordonnées cartésiennes.	Graphiques à coordonnées polaires.
L'origine des ordonnées est une *ligne droite*, appelée *axe des* x, laquelle, partant d'un point *d'origine*, peut s'étendre jusqu'à l'infini dans deux directions opposées, c'est-à-dire dans le sens positif et dans le sens négatif.	L'origine des coordonnées est un seul *point* appelé "*pôle*", qui sert pour toutes les ordonnées.
Les ordonnées et les abscisses représentent toujours des déplacements *linéaires* mesurés à partir d'une ligne d'axe.	Les ordonnées sont, comme dans les graphiques cartésiens, des déplacements *linéaires*; elles sont mesurées à partir d'un point - le pôle - qui est le même pour toutes les ordonnées. Les abscisses deviennent des déplacements *angulaires* autour du pôle.
Les ordonnées sont toujours parallèles les unes aux autres.	Les ordonnées *rayonnent autour* du pôle, et ne sont jamais parallèles.
L'élément d'abscisse, $d\,x$ ou Δx, qui sépare deux ordonnées, est une quantité *linéaire*.	L'élément d'abscisse, dx ou Δx, entre deux ordonnées est remplacé par un petit déplacement angulaire, $d\theta$ ou $\Delta\theta$.
En prenant le temps, t, comme variable indépendante nous aurons $d\,x = d\,t$.	En prenant le temps, t, comme variable indépendante, nous aurons $d\theta = dt$.

Digitized by Google

La quantité dx délimite la largeur d'une petite tranche élémentaire du graphique, laquelle est *quadrangulaire* de forme.

Sa longueur est égale à l'ordonnée moyenne (y) et sa largeur est égale à dx.

L'aire élémentaire, da, est égale à $da = y\,dx$.

L'aire d'une tranche est toujours proportionnelle à l'ordonnée moyenne.

La quantité $d\Theta$ délimite une petite tranche élémentaire du graphique, laquelle est *triangulaire* de forme.

Sa hauteur est égale à l'ordonnée moyenne ($y = \rho$) et sa base est égale à $ds = \rho\,d\Theta$.

L'aire élémentaire est égale à

$$da = \rho ds = \frac{1}{2}\rho^2 d\Theta.$$

L'aire d'une tranche est toujours proportionnelle au carré de l'ordonnée moyenne.

L'aire d'un graphique de fonction variable quelconque peut se répresenter dans les deux cas par une aire *équivalente* que donnerait une certaine ordonnée constante appelée *ordonnée moyenne*.

L'aire équivalente A_e est celle d'un quadrangle de longueur $x = t$ et de largeur $y = Y$, soit $A_e = Y\,t$.

L'ordonnée moyenne constante, Y, est égale à la vraie moyenne arithmétique de la somme des ordonnées.

$$Y = I_e = \frac{1}{t}\int_o^t i\,dt$$

La valeur de l'ordonnée moyenne I_e est toujours moindre que la valeur du rayon moyen, I_p, du graphique polaire correspondant.

L'aire équivalente A_p est celle d'un secteur dont l'angle vectoriel est égal à Θ et le rayon à I_p, ce qui donne

$$A_p = \frac{I_p^2 \Theta}{2}.$$

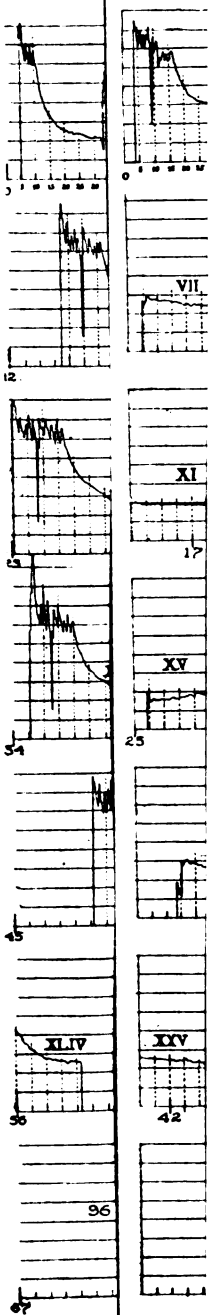
L'ordonnée moyenne constante, I_p, est égale à

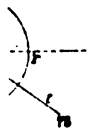
$$I_p = \sqrt{\frac{1}{t}\int_o^t i^2\,dt}$$

soit à la racine carrée de la moyenne de la somme des ordonnées.

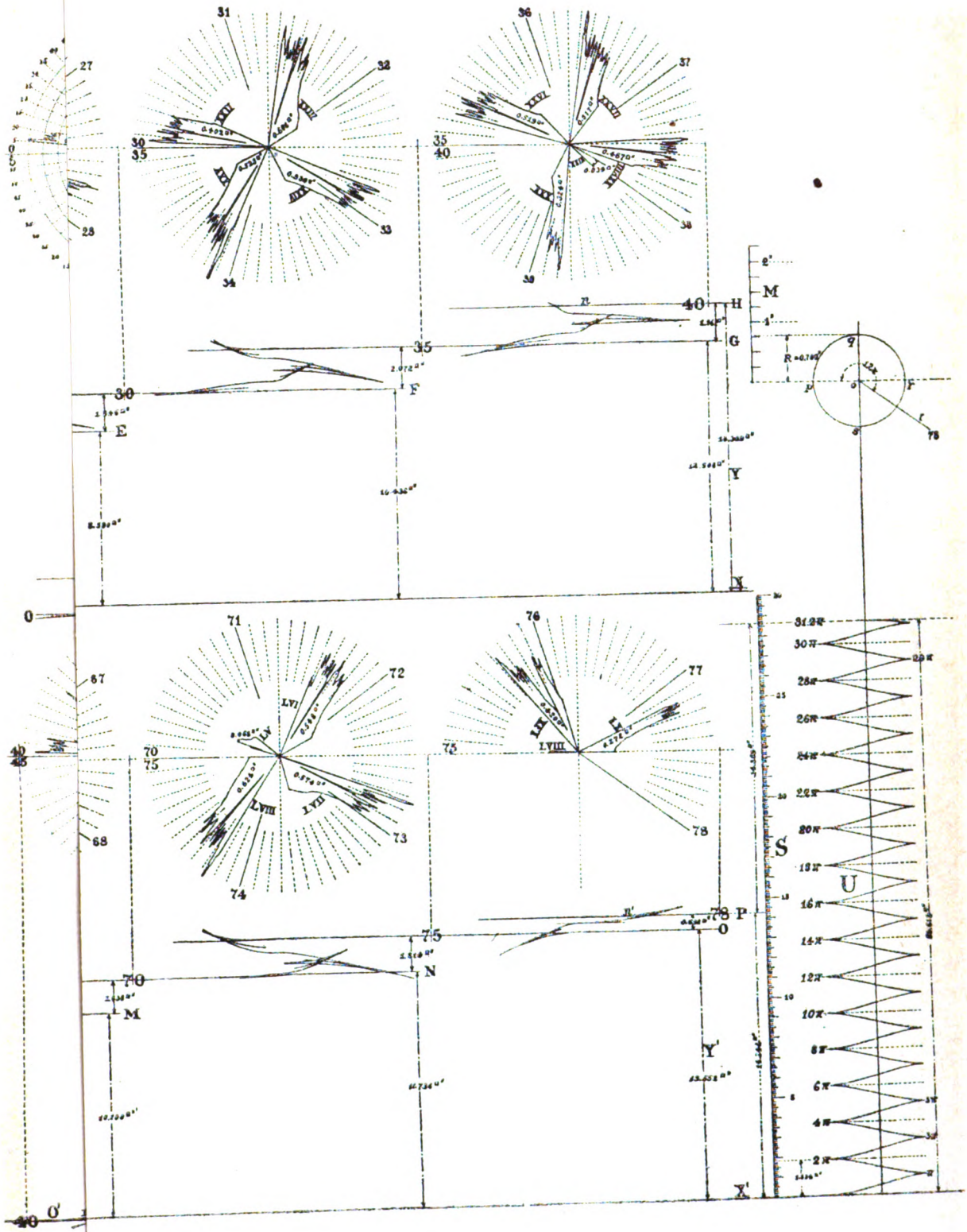
Cette valeur, reportée sur le graphique cartésien correspondant, est toujours supérieure à la valeur de l'ordonnée moyenne, I_e, de ce graphique.

Digitized by Google


VII
XI
17
XV
25
XLIV
56
XXV
42
96

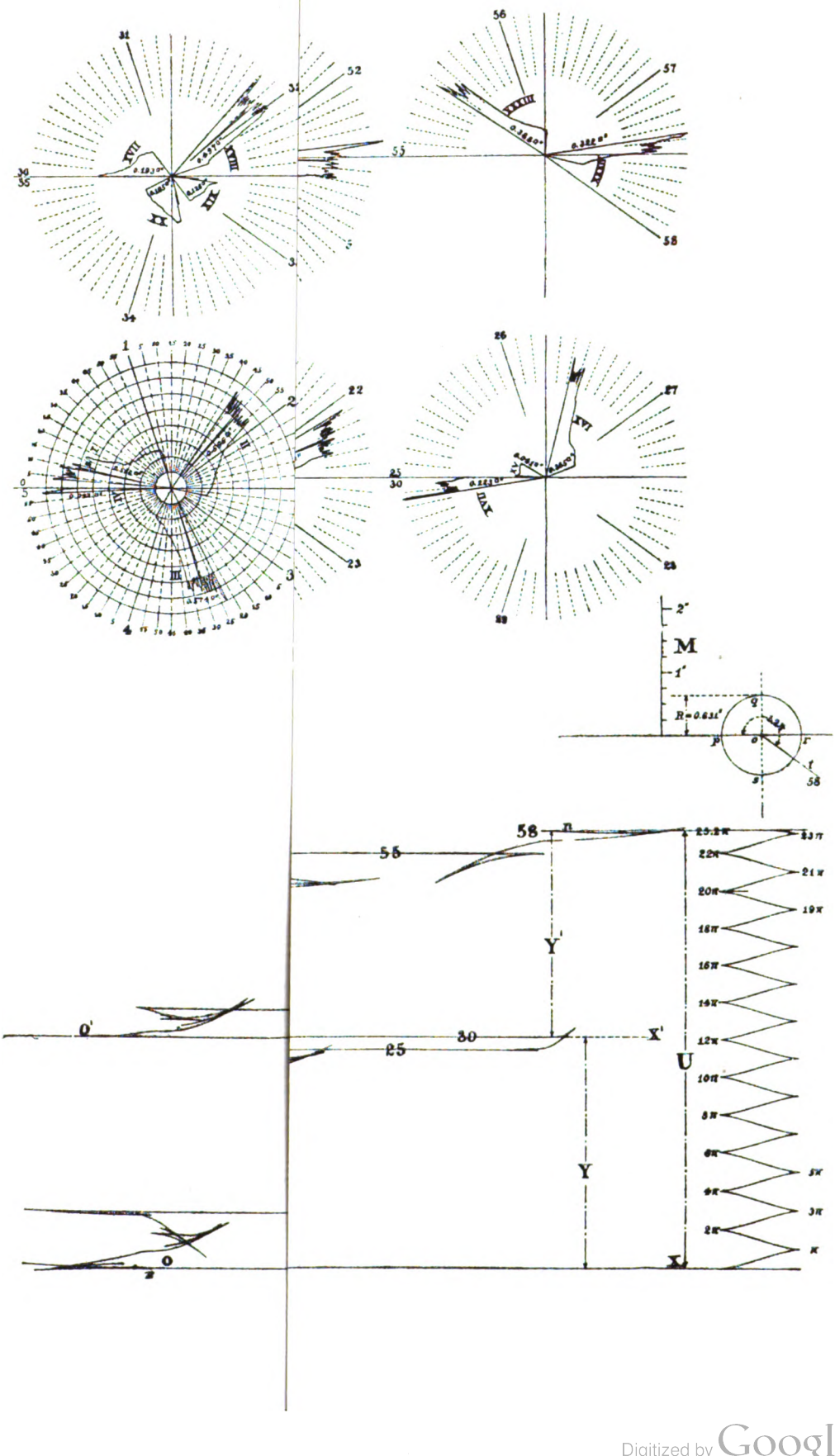


Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google

DISCUSSION

M. le Président A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). *M'ayant dû plus d'une fois soumettre au laborieux travail qu'est la détermination, par la méthode des carrés des ordonnées, du courant virtuel produisant un échauffement donné, je suis à même d'apprécier l'importance et la semplicité de la méthode que M. Mailloux vient d'exposer. Cette méthode eût rendu autrefois de bien grands services, particulièrement pour déterminer le régime et la capacité effective de moteurs à charge intermittente, ou encore l'échauffement des rhéostats et des générateurs spéciaux à volant, qui sont en usage pour la commande des laminoirs réversibles.*

M. G. CAMPOS (Milan). — *Le Mémoire de M. Mailloux fait connaître une méthode à la fois nouvelle et intéressante pour la détermination de la valeur variable de l'échauffement dû à un courant. Quand on peut se servir d'instruments enregistreurs, dans lesquels les déplacements sont exactement proportionnels aux carrés des intensités (comme dans les types électrodynamiques de précision, à relais, de la Maison C. G. S. Olivetti), on arrive directement à la valeur cherchée sans qu'il soit nécessaire de recourir au calcul ni à un artifice quelconque. En effet, il suffit de prendre l'ordonné moyenne du diagramme (moyenne arithmétique) pour en déduire aussitôt la moyenne géométrique, c'est-à-dire précisément la valeur du courant constant qui produirait un échauffement égal. On peut aisément relever cette valeur au planimètre, en intégrant l'aire du diagramme et en divisant par le développement correspondant au temps.*

M. C. O. MAILLOUX (New York) *admet l'opportunité de l'observation; il demande si dans les instruments dont parle M. Campos on a suivi avec assez d'exactitude la loi des carrés pour les déplacements.*

M. G. CAMPOS (Milan). — *Avec une parfaite exactitude. On ne peut construire ces instruments pour courant continu que pour*

Digitized by Google

une intensité ne dépassant guère une dizaine d'ampères; mais pour les courants alternatifs il n'y a pas de limites, et l'utilité qu'ils présentent est évidente, dans les cas considérés, pour obtenir directement la valeur cherchée. Quand on n'emploie pas, ou on ne peut pas employer, ces instruments, les seuls qui offrent les garanties désirables d'exactitude, alors la méthode de M. Mailloux représente un évident progrès pratique sur toutes celles qui ont été employées jusqu'à ce jour.

Digitized by Google

The Nature of Transients in Electrical Engineering.

CHARLES PROTEUS STEINMETZ (Schenectady, N. Y. - U. S. A.).

1. — Accompanying the flow of electric power through a circuit, there occurs a dissipation of power in the circuit, by

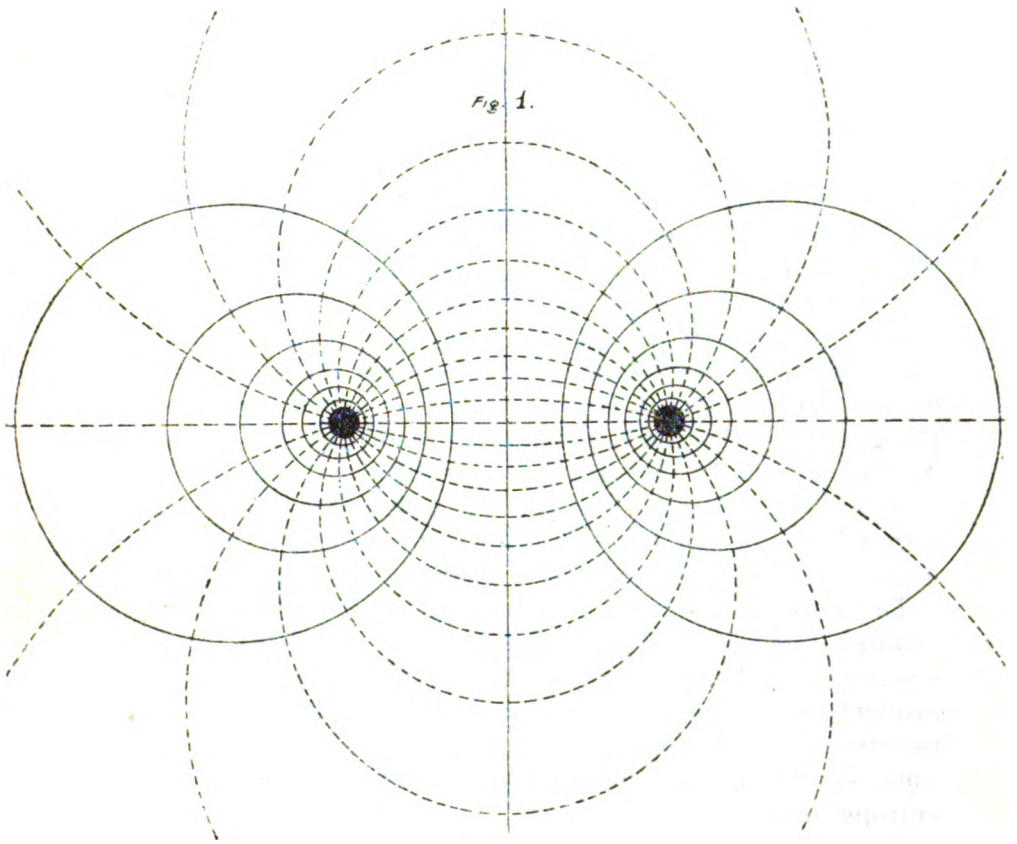


Fig. 1.

its resistance. There also exists a condition of stress in the medium surrounding the conductor, which we call a *magnetic field*, and represent by lines of magnetic force, as shown in

Digitized by Google

drawn circles in Figure 1. There further exists a condition of stress in the space surrounding the conductor, which is called the electrostatic or *dielectric field*, and is represented by lines of dielectric force, shown dotted in Figure 1. This figure is the cross section of the two fields, the magnetic field and the dielectric field, of conductor and return conductor.

Neither the strength of the magnetic field, nor that of the dielectric field is proportional to the power which flows along the conductor, but the product of both fields is proportional to the power. We therefore resolve electric power into two component factors, of which the one is proportional to the magnetic, the other proportional to the dielectric field. The factor, which is proportional to the magnetic field, is called the current i; the factor which is proportional to the dielectric field, is called the "*voltage*" e. Thus:

$$p = ei$$

represents the resolution of electric power into two factors, which are proportional respectively to the two components of the electric field, the dielectric and the magnetic.

i is the quantity component of electric power: the larger it is, the greater is the loss in transmission, and the larger transmission conductors are required. Inversely, the greater e is, the further the electric power can be sent, the smaller a conductor is required and the less is the loss, but at the same time the greater is the tendency of the electric power to leave the conductor, that is, the greater is the difficulty of insulating the conductor so as to keep the power flowing in its proper channel. e thus is of the nature of an intensity component, and is frequently spoken of as electric pressure or tension.

The resolution of power or energy into the product of a quantity factor and an intensity factor is not characteristic of electric energy alone. For instance, hydraulic power is the product of the flow or quantity of water and of the head or pressure of it. Gravitational energy is expressed by weight times elevation: heat energy as the product of temperature and entropy, etc.

There exist in the magnetic and in the dielectric field of the conductor forces, which act on, and produce motion of bodies brought in the field, that is, are capable of doing work, and these fields thus must contain energy. Thus in the space sur-

Digitized by Google

rounding the conductor which transmits electric power, there is a storage of energy in two forms, as magnetic and as dielectric energy, and the *energy storage* in the space outside of the conductor is as essential a part of the phenomenon of electric power, as is the *power dissipation* in the conductor, which directs the flow of power.

The magnetic field is proportional to the current, with a proportionality factor, which is called the *inductance* of the circuit, and denoted by L. That is:

$$\Phi = Li \text{ (1)}. \tag{1}$$

The dielectric field is proportional to the voltage, with a proportionality factor, which is called the *capacity* of the circuit, and denoted by C. That is:

$$\Psi = Ce. \tag{2}$$

The stored energy of the magnetic field is:

$$w_1 = \frac{Li^2}{2} \tag{3}$$

and the stored energy of the dielectric field is:

$$w_2 = \frac{Ce^2}{2} \tag{4}$$

while the power consumed in the conductor, by the electric current, is:

$$p_1 = ri^2 \tag{5}$$

where r = *resistance* of the circuit.

Occasionally, power may be consumed also by the voltage,

---

(1) In this equation, every line of magnetic force, which surrounds the conductor n fold, is counted n times, and as unit of flux is used the *volt line*, or 10^8 lines of magnetic force. Counting each line of magnetic force singly, the equation (1) would read:

$$n\Phi = Li\,10^{-8}. \tag{1a}$$

Digitized by Google

in the form of a leakage from the conductor, by corona and similar phenomena, and may be represented by:

$$p_2 = ge^2 \qquad (6)$$

were g is the *shunted conductance.*

As seen, inductance L and capacity C are the proportionality coefficients of the magnetic and the dielectric field, or the coefficients of energy storage by the magnetic and the dielectric field respectively, while resistance r and shunted conductance g are the corresponding coefficients of power dissipation.

2. — Suppose, that to an electric circuit a second circuit is connected and the total current thereby increased: this also increases the stored magnetic energy. Closing the second circuit perhaps decreases the voltage and thereby the stored dielectric energy of the first circuit, but at the same time adds dielectric energy, that of the second circuit. Inversely, disconnecting a circuit, or an apparatus, decreases the stored energy. In general, any change made in an electric system, also changes the amount of stored magnetic or dielectric energy or both, increasing or decreasing it.

Stored energy cannot be increased or decreased instantly however, because this would represent infinite power, and some interval of time must therefore elapse after every change of circuit conditions, dur. Ξ g which, in case of an increase of the stored energy, this energy is supplied by the circuit as a flow of power into the space, or in case of a decrease of stored energy, the surplus energy is returned to the circuit by a return flow of power from the space into the circuit.

After every change in the condition of an electric circuit, which involves a change of the stored energy, there must therefore be a transition period during which the stored energy readjusts itself from the previous to the new value, and during this period power flows from the circuit into surrounding space, or returns from surrounding space into the circuit. This flow of power must be temporary, lasting only until the additional stored energy has been supplied, or the surplus stored energy returned to the circuit, thus it is a *transient.* Since the magnetic field is proportional to the current, the power required for its increase or decrease of stored energy is given by an *inductance*

Digitized by Google

voltage; since the dielectric field is proportional to the voltage, the power which supplies or returns its stored energy, is given by a current, the *capacity current.*

An electrical transient therefore is the phenomenon, by which at a change of circuit conditions, the stored magnetic and dielectric energy of the electric system readjust themselves to the changed circuit conditions.

Herefrom it follows, that transients are not a specific electrical phenomenon, but must occur in any system of power flow, in which energy is stored, whether electrical, mechanical, thermal, etc., and are the phenomenon of the readjustment of the stored energy required by any change of the condition of the system.

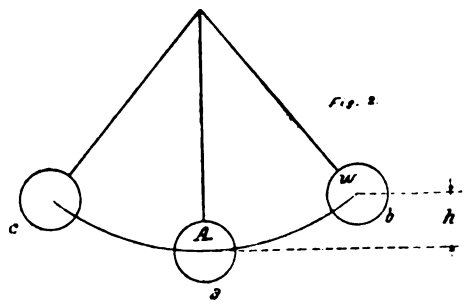
For instance, in the supply pipe of a hydraulic turbine, energy is stored by the momentum of the moving water, $\frac{mv^2}{2}$. If the load increases and the gates open to admit more water, it takes some time before the velocity of the water in the pipe has increased to supply increased power, and during this time, energy has been drawn from the turbine supply, and stored as momentum of the water column. Inversely, the closing of the valves to reduce the flow of water, at a decrease of load, first results in an increase of pressure and therefore of power, until gradually the kinetic energy of the moving water column has been consumed. The problem of the governing of a water power thus is largely that of taking care of the transients resulting from the stored kinetic energy of the water column. Similarly, acceleration and deceleration are the mechanical transients of the trolley car or railway train; the period of firing up and of cooling down are the thermal transients of the steam boiler, of the blast furnace etc.

Transients thus are not specifically electrical phenomena, but inherent in all those systems of power, in which storage of energy exists.

3. — Energy may be stored in one form only, or in two or more forms. In the railway train, energy can be stored in one form only, as mechanical momentum, and the only change of stored energy, which can occur, is an increase or a decrease. An instance of a system, in which energy is stored in two forms, as kinetic mechanical energy, and as potential gravitational

Digitized by Google

energy, is the pendulum, Figure 2. In end position b the weight w contains the potential energy of elevation, wh, but no kinetic energy. During its fall, it accelerates, the potential energy decreases, but the kinetic energy increases, until in the middle position, a, all the energy is kinetic energy $\frac{mv^2}{2}$. Moving further, the kinetic energy again decreases and converts to potential energy, until in the end position c all the energy is again potential, none kinetic, and in this manner periodically the stored



energy changes between potential energy of elevation and kinetic energy of motion; but at the same time, the total stored energy steadily decreases, by being dissipated in friction.

In a system, in which energy can be stored in two or more forms, in addition to the increase or decrease of stored energy, a transformation of energy from one form to the other may thus occur, and usually does occur during the transient. Such transformation of energy generally is periodic, as illustrated on the pendulum Figure 2. It may however be in one direction only. For instance, if we assume the pendulum submerged in a very viscous liquid: while the weight falls from position b towards a, its potential energy is converted to kinetic energy, and the velocity increases hereby, but at the same time rapidly decreases by friction, and if the friction is sufficient, the weight never passes beyond position a, but comes to rest in this position: the motion is aperiodic or dead-beat.

As we have seen, in the electric circuit, energy is stored in two forms, as magnetic and as dielectric energy. The discharge of a condenser through an inductive circuit of very high resistance is a transient, in which energy is transformed from one

Digitized by Google

form, dielectric, into another, magnetic, but not back again, that is, is aperiodic, while usually the condenser discharge through an inductive circuit is a periodic transient. The aperiodic electrical double energy transients are of relatively little importance, since the condition of their existence is a very high rate of energy dissipation, as seen above, and they therefore are of short duration and limited power.

Applying the preceding general discussion to the electric circuit, we find two classes of transients:

a) Single energy transients, in those circuits, in which energy is stored in one form only, usually as magnetic energy, and the transient thus can consist only of an increase or a decrease of the stored energy;

b) Double energy transients, in those circuits, in which energy is stored in two different forms, as magnetic and as dielectric energy, and in addition to an increase or decrease of stored energy, a transformation of the stored energy from one form to the other occurs, which usually is periodic.

4. — In electric lighting circuits of 110 or 220 volts, in railway circuits of 600 volts, and even in primary distribution circuits of 2200 volts, the stored dielectric energy, $\frac{Ce^2}{2}$, is so small compared with the stored magnetic energy $\frac{Li^2}{2}$, that it can be neglected, except in very special cases, as lightning discharges, and the circuit thus can be treated as one storing energy in one form only, as magnetic energy.

Consider a simple case of such a circuit, a wire coil Figure 3, of resistance r and inductance L, traversed by a continuous current i_0. There exists then a voltage $e_0 = ri_0$ at the terminals of the coil, and a magnetic flux Φ_0 traverses the coil, which with the current i_0 has the number of magnetic interlinkages:

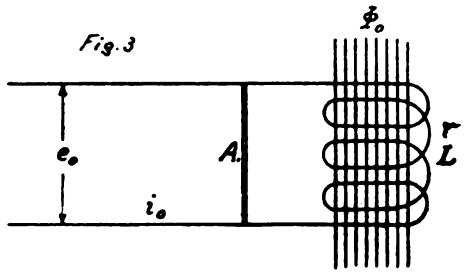
$$n\Phi_0 = Li_0 10^8 \text{ (1)}. \tag{7}$$

Now suppose we suddenly change the circuit condition by

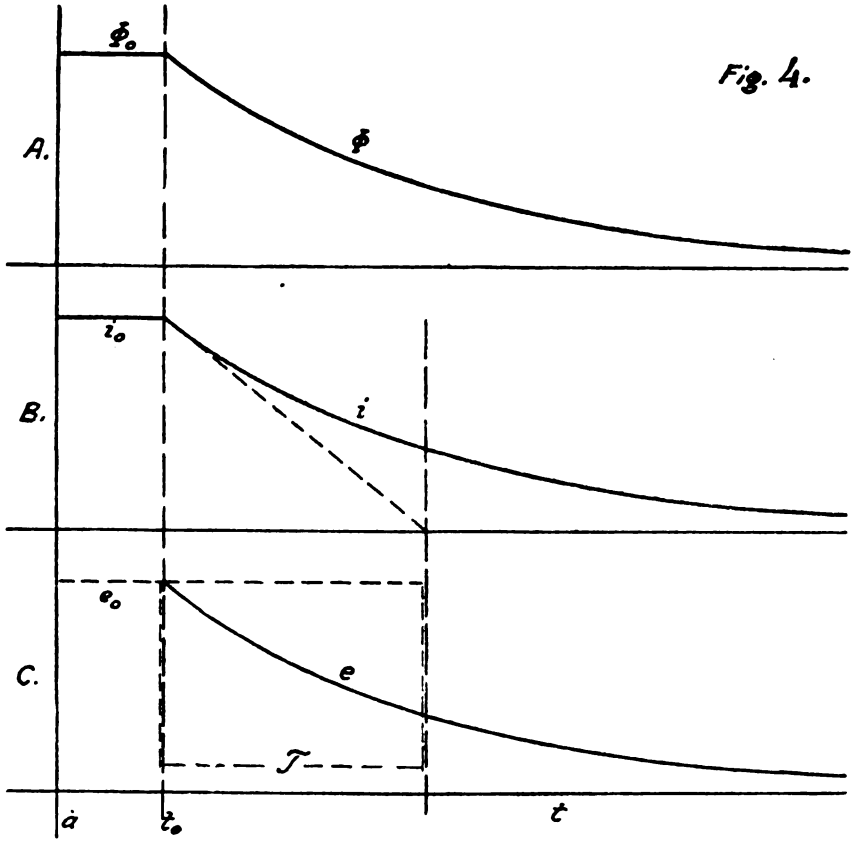
(1) The factor 10^8 comes in because L is given in henries and i_0 in amperes, which respectively are 10^9 and 10^{-1} absolute units.

Digitized by Google

removing the voltage e_0, as by short circuiting the coil upon itself, as shown by A in Figure 3. With no voltage impressed



upon the coil and therefore no power supplied to it, the current



in the coil must be zero, and thus also the magnetic flux interlinked with it. At the withdrawal of the impressed voltage e_0,

Digitized by Google

the current and thereby the magnetic flux cannot instantly drop from its previous values i_0 respectively Φ_0 to zero, as the magnetic flux represents an amount of stored energy $\frac{Li_0^2}{2}$, which cannot instantly be dissipated. The current and with it the magnetic flux thus must gradually decrease, from their initial values i_0 and Φ_0 to zero, as illustrated by curves A and B of Figure 4. To cause a current to flow, a voltage is required, and thus, while the current i decreases from its initial value i_0 to 0, there must be a voltage $e = ri$ acting in the coil circuit, to produce the current. This voltage must start from the initial value $e_0 = ri_0$ and gradually decrease to zero, simultaneously with the current. As the impressed voltage has been withdrawn from the coil, this voltage must be an induced voltage, and is induced by the decreasing magnetic flux Φ. That is, the magnetic flux Φ, A in Fig. 4, decreases at such a rate as to induce in the coil the voltage $e = ri$, which is shown at C in Figure 4. By the general law of induction, it is:

$$e = ri = -n\frac{d\Phi}{dt}\,10^{-8}$$

$$= -\mathrm{L}\frac{di}{dt} \tag{8}$$

or, re-arranged:

$$\frac{di}{i} = -\frac{r}{\mathrm{L}}\,dt; \tag{9}$$

integrated, this gives:

$$i = i_0\,\varepsilon^{-\frac{r}{\mathrm{L}}t} \tag{10}$$

where i_0 is the initial value of the current, at $t = 0$, as the equation of the transient current in the coil. As Φ and e are proportional to the current i, it is:

$$\left.\begin{aligned} \Phi &= \Phi_0\,\varepsilon^{-\frac{r}{\mathrm{L}}t} \\ e &= e_0\,\varepsilon^{-\frac{r}{\mathrm{L}}t} \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Digitized by Google

The question then is: how long does the transient last? Theoretically, it lasts for ever, since the current i becomes zero only for $t = \infty$. Practically, it becomes negligible after some time, usually a very short time. The most convenient way of getting a conception of the duration of the transient is to ask, how long would the transient last, if it would not decrease, but retain its initial value. That is, we consider as the duration of the transient voltage e in C of Figure 4, the time T, during which the voltage could be maintained at its initial or full value e_0. To maintain constant induced voltage e_0, the magnetic flux Φ and thus the current i would have to change at a constant rate, and at the same rate at which it drops in the first moment, at $t = 0$. Thus, if we draw the tangent on the curve i at the point $t = 0$, this gives the duration T of the transient, by its intercept on the zero line, as shown by the dotted line in Figure 4 B.

As the induced voltage e is the rate of change of the magnetic flux, the total induced voltage: $\int e\,dt$ is the total change of the magnetic flux, from its initial value Φ_0 to its final value 0: $n\Phi_0 10^{-8} = L i_0$, regardless in what manner, that is, at what rate the magnetic flux Φ changes. Thus the total voltage $\int e\,dt$, or the area of the voltage curve, whether this be the curve e, or the rectangle $e_0 T$, is $L i_0$. This gives the expression:

$$e_0 T = L i_0$$

$$T = L \frac{i_0}{e_0} = \frac{L}{r} \tag{12}$$

that is, the duration T of the transient is the ratio of the energy storage coefficient L, to the power dissipation coefficient r.

This is a general law of transients. Thus in a transient resulting from the stored dielectric energy, the duration would be:

$$T = \frac{C}{g}. \tag{13}$$

Since the coefficient of the exponent of the exponential

Digitized by Google

function, $\frac{r}{L}$, is the reciprocal of the duration T of the transient, the equations (10) and (11) can also be written:

$$\left.\begin{aligned} i &= i_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \\ e &= e_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \\ \Phi &= \Phi_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

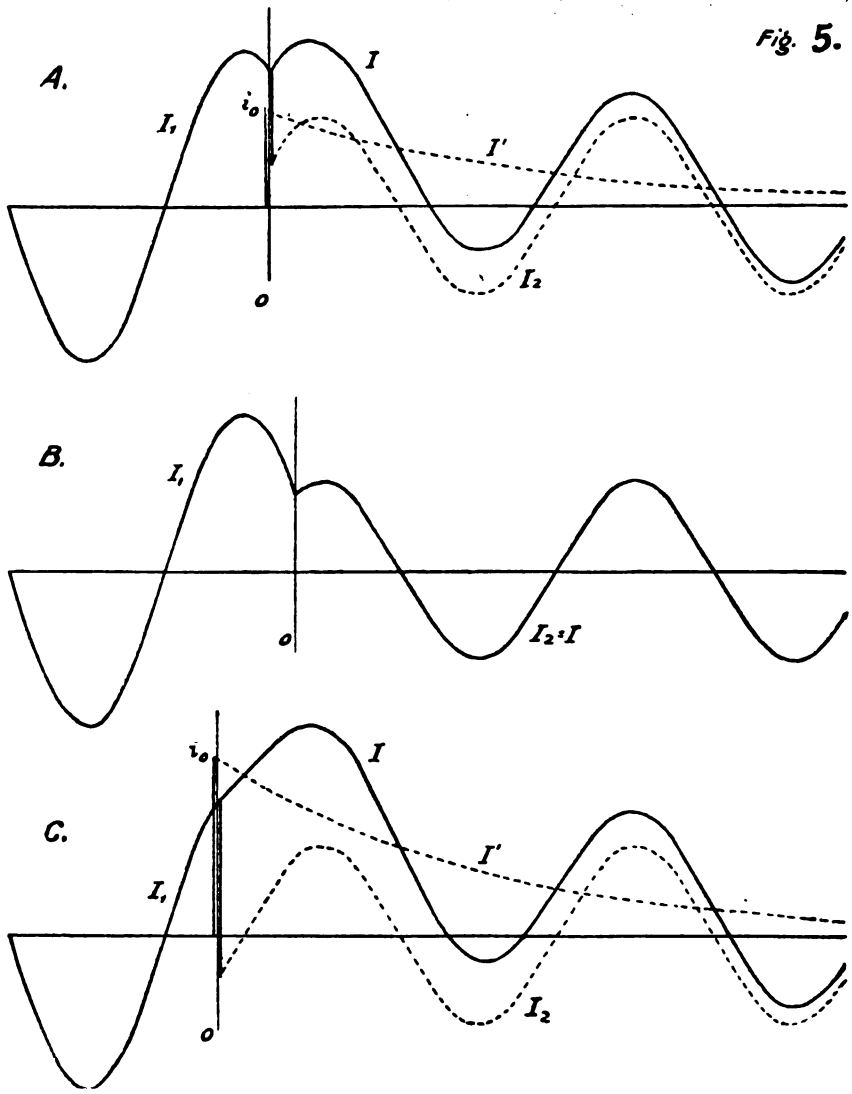
These simple equations are based on the assumption, that the magnetic flux Φ is proportional to the current i, that is, the inductance L constant. This is true only, if the surrounding medium is not magnetic, and with magnetic materials only approximate below the range of magnetic saturation.

5. — Thus far, we have considered that only a single energy transient exists in the circuit, that is, the circuit is left to itself, without any power supply, and dissipates its stored energy. Usually, the final condition reached by the transient is not zero current and power, but some value of current and power, differing from the initial value. Thus for instance in Figure 3, if we open the short circuit A, the current again starts in the coil, and a transient represents the gradual increase of the current from its initial value 0, to the final value i_0. Or if in an alternating current circuit, at a moment where the current in the circuit has the instantaneous value i_1, we change the circuit condition so as to require at this moment the instantaneous value of current i_2 (for instance, by changing the resistance, the voltage, etc.). All these cases however can be reduced to the case above considered: if at the moment of change the current in the circuit is i_1, but the changed circuit condition would require a current i_2, we can assume in the circuit to exist two currents, the current i_2, and a current i_0, which is the difference between the actual current i_1 in the circuit, and the current i_2, which should exist: $i_0 = i_1 - i_2$. The current i_2 is due to the circuit conditions, the voltage impedance, etc., and is a permanent current. That is, the voltage existing in the circuit produces, under the changed circuit conditions, the current i_2. The

Digitized by Google

current i_0 however has no voltage back of it, is a remanent of the previous circuit condition, that is, a transient current,

Fig. 5.



and as such dies out by the equations above discussed, irrespective whether it is the only current existing in the circuit, or whether it is superimposed upon the permanent current i_2 (1).

(1) Permanent here means resulting from the conditions existing in the circuit, but may be an alternating current, or even a slow transient current.

Digitized by Google

Thus the phenomena occurring during the transition period of energy re-adjustment can always be resolved into the superposition of a purely transient, and a permanent phenomenon. This applies to the single energy transient as well, as to the case, where energy is stored in two or more forms. It is based on the proportionality law of electric currents: if a voltage e_1 produces a current i_1, and a voltage e_2 produces a current i_2, the voltage $e_1 + e_2$ produces the current $i_1 + i_2$. It therefore does not apply any more in circuits, in which current and voltage are not proportional, as circuits containing magnetic materials at densities above saturation.

In this manner, the single energy transients can be constructed or calculated for all conditions of circuit changes. For instance, let in Figure 5 I_1 represent an alternating current, and at the moment $t = 0$, where this current has the value i_1, a change is made in the circuit, its resistance changed, or voltage changed, etc., and the change is such that it causes the current I_2 to flow in the circuit. This current I_2 would have the instantaneous value i_2 at $t = 0$. It is shown dotted in Fig. 5. At $t = 0$ there thus exists in the circuit the instantaneous value i_2 of the permanent alternating current I_2, and the transient current $i_0 = i_1 - i_2$. This latter dies out by the equation discussed above:

$$i' = i_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}} = (i_1 - i_2)\varepsilon^{-\frac{t}{T}}. \qquad (15)$$

It is shown by the dotted line I^1 of Figure 5, and the total current I then is derived by adding the transient current I^1 to the permanent current I_2, as shown in Figure 5, for various conditions.

6. — The single energy transients of electric circuits are rarely of serious importance: as they are a gradual change from the previous to the after condition of the electric circuit, their inductive effects are usually small, their energy is moderate and is rapidly dissipated, and they usually require consideration only to avoid the annoyance which may be caused by them. For instance, when closing the field exciting circuit of a direct current shunt motor, an appreciable time — several seconds — elapses until the field magnetism has built up, and

Digitized by Google

if the armature circuit is closed too soon, an excessive starting current would result.

Of serious moment these transients become if of considerable energy, as in highly inductive circuits, as magnetic fields of large machines, especially if they are forced to be of very short duration: the opening transient of the inductive circuit. The quicker an inductive circuit is opened, the greater the rate of dissipation of its stored energy, that is, the higher the voltage and power of the transient, and instantaneous opening would result in the induction of infinite voltage, that is, destruction of the insulation. To a considerable extent an inductive circuit protects itself against too rapid opening, by the arc of the induced voltage following the switch blades and thereby retarding the opening of the circuit. The problem of switching inductive circuits thus is, to produce a mechanism which opens quick enough to avoid damage from the arc at the switch, but slow enough to avoid dangerous induced voltages.

Occasionally single energy transients are of serious moment indirectly, by the power production which they cause. An instance hereof is the momentary short circuit current of alternators. At open circuit, the magnetic field of an alternator is that due to the field excitation alone. At short circuit, it is due to the resultant of the field excitation and the demagnetizing armature reaction of the short circuit current, and the magnetic field flux then is much lower, in large turbo-alternators occasionally only one-tenth as large as the magnetic field flux at open circuit with the same field excitation. At the moment of short circuit, the magnetic field flux can not instantly drop from its open circuit value to its short circuit value, since it represents stored energy, and thus gradually drops, as shown by Φ in Figure 6 A. If the permanent short circuit current, which results from the final value Φ_0 of the field flux, is p times full load current, and Φ_0 is only $1/n$ of the open circuit field flux Φ_1, then in the first moment of the short circuit, when the flux Φ is still nearly equal to Φ_1, the armature short circuit current would rise to nearly n times its permanent value, or pn times full load current, as shown by i_1, i_2, i_3 in Figure 6 B. The final short circuit flux Φ_0 is due to the resultant of field excitation and armature reaction. At the beginning of the short circuit, the armature reaction is n times the normal, as shown by F in Fig. 6 C, hence, the field excitation also must be n

Digitized by Google

Digitized by Google

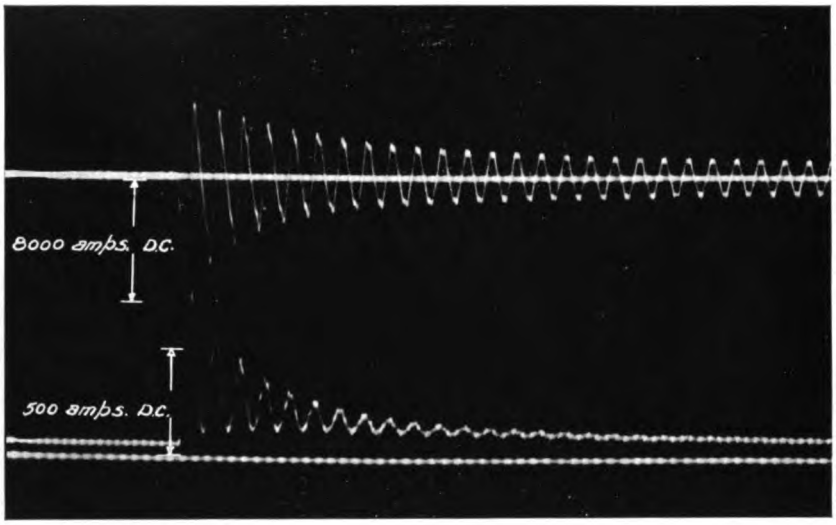
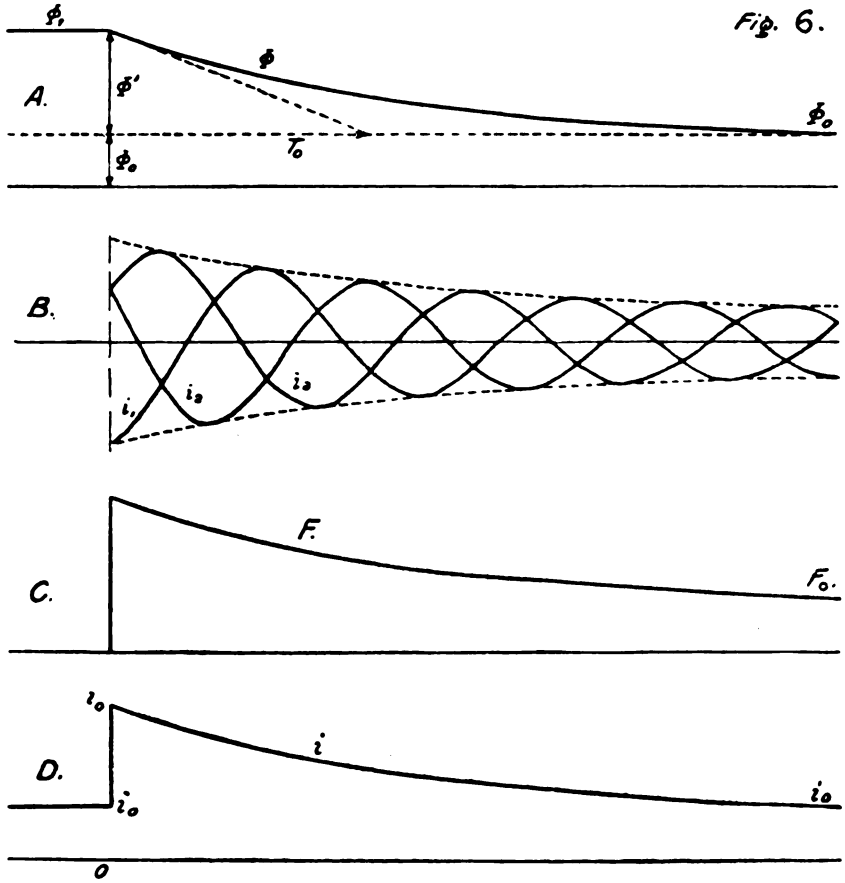


Fig. 7.

C. P. Steinmetz.

Digitized by Google

times the normal. That is, the magnetic field at the moment of short circuit begins to drop at such a rate as to induce in the field exciting winding a voltage which gives a momentary rush of field current as shown by i in Figure 6 D. With po-



lyphase short circuit, on this rush of field current then superimposes a full frequency transient pulsation, due to the starting transient of the armature current, as shown in oscillogram Fig. 7, which represents a short circuit of a large treephase turbo alternator. With single phase short circuit, due to the pulsating nature of the single phase armature reaction, a permanent double frequency pulsation appears in the field current, as seen in oscillogram Figure 8, and occasionally, by the superposition of the full frequency starting transient on the double frequency

Digitized by Google

pulsation, the latter appears with alternately high and low peaks, as seen in oscillogram Figure 9. Figure 8 and 9 give single phase short circuits of the same alternator under the same conditions, differing from each other by the point of the wave at

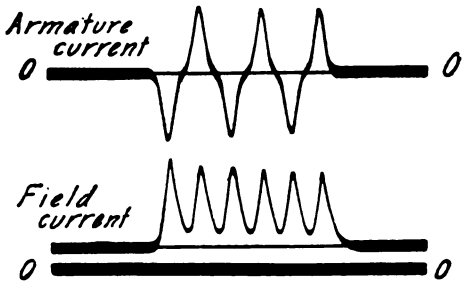


FIG. 8.

which the short circuit starts. From the equation of the single energy transients, and the constants of the machine, these short circuit phenomena can thus be predetermined.

7. — In overhead electric circuits of 30.000 volts and over, and in underground cable circuits of 10.000 volts and over, the dielectric energy $\frac{Ce^2}{2}$ is of the same magnitude as the magnetic energy $\frac{Li^2}{2}$, and such circuits cannot be treated any more as circuits storing energy in one form only. The total stored energy of such high voltage electric circuits thus is:

$$w = \frac{Li^2}{2} + \frac{Ce^2}{2}. \tag{16}$$

With two different forms of energy storage, not only an increase or decrease of stored energy is possible, but also a transformation of energy from one form to the other. This transformation may be in one direction only, or may be periodic. The former occurs if the power dissipation is very rapid, and in this case the transient is of so short duration and limited energy, as to be rarely of serious moment, and therefore will not be considered here, but only the second case, when the

Digitized by Google

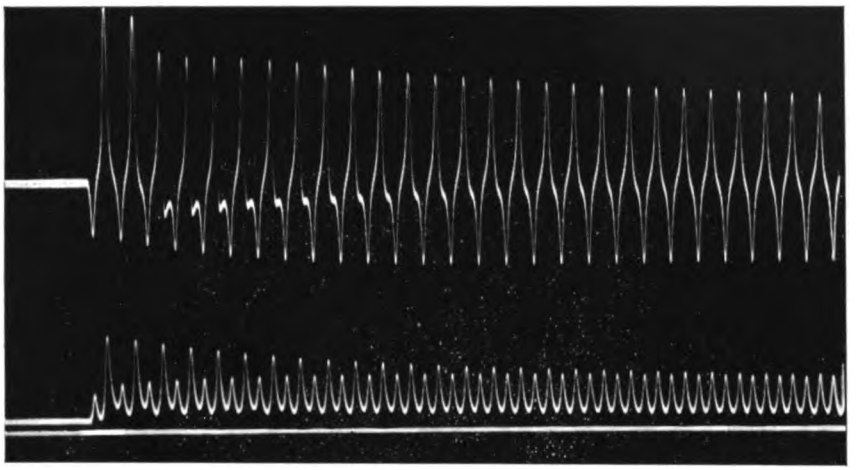


Fig. 9.

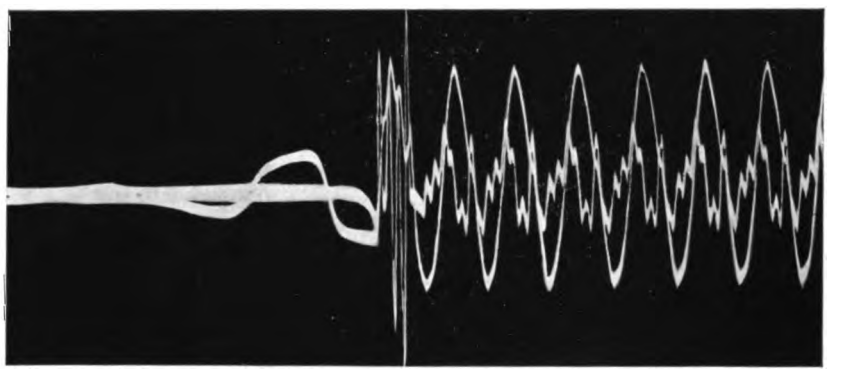


Fig. 10.

C. P. STEINMETZ.

Digitized by Google

Digitized by Google

energy transformation is periodic, and the gradual decrease of energy fairly slow, that is, the duration of the transient relatively long.

Considering first the periodic part, or factor, of the phenomenon:

The magnetic energy is a maximum $\frac{Li_0^2}{2}$, that is, the current i a maximum i_0, when all the energy is magnetic energy, and the dielectric energy is zero, that is $e = 0$. The dielectric energy becomes a maximum $\frac{Ce_0^2}{2}$, and the voltage e thus a maximum e_0, when the magnetic energy is zero, that is, $i = 0$.

Hence maximum current corresponds with zero voltage, and maximum voltage with zero current. That is, if we represent the current by the cosine function:

$$i = i_0 \cos (\Phi - \gamma) \tag{17}$$

the voltage is represented by the sine function:

$$e = e_0 \sin (\Phi - \gamma) \tag{18}$$

where:

$$\Phi = 2\pi ft \tag{19}$$

and f is the — still unknown — frequency, and γ the phase angle at the moment of the start of the transient.

At the current maximum i_0, all the energy is magnetic:

$$\frac{Li_0^2}{2};$$

at the voltage maximum e_0, all the energy is dielectric:

$$\frac{Ce_0^2}{2}.$$

It is however the same amount of energy (neglecting the gradual energy dissipation, as stated above), hence it is:

$$\frac{Li_0^2}{2} = \frac{Ce_0^2}{2} \tag{20}$$

Digitized by Google

and herefrom follows:

$$\frac{e_0}{i_0} = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{21}$$

where the quantity:

$$z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{22}$$

is a *constant of the circuit*, of the nature of an impedance, which in overhead transmission lines usually is between 200 and 600 ohms, but much smaller in underground cables, much larger in coiled circuits, as the high potential winding of a transformer, z_0 is called the *natural impedance* of the circuit.

This equation (21) is extremely important. It applies to all double energy transients of the electric circuit, and thereby permits to calculate the voltage of an oscillation, surge, impulse or traveling wave from its current, and inversely.

For instance, when considering the problem of lightning protection of a transmission line, from the maximum voltage, which lightning may produce on the line, equation (21) gives the maximum discharge current, and thereby the maximum resistance which is permissible in the lightning arrester, without backing up the voltage by the resistance of the discharge path. Thus, in a 30.000 volt line, the insulators may be expected to stand 60.000 volts, and momentarily probably 120.000 volts, and this is the maximum voltage, to which a lightning stroke could momentarily raise the line: a higher voltage would spill over the insulators, or puncture them. Assuming $z_0 = 400$, $e_0 = 120.000$ volts gives a maximum discharge current of $i_0 = \frac{e_0}{z_0} = 300$ amperes, and in such a line, no lightning stroke could produce a higher discharge current than 300 amperes, and if the maximum voltage rise in the station shall be limited to 50 % above full voltage, that is 15.000 volts excess, the impedance of the discharges path of the lightning arrester must be limited to a maximum of $\frac{15.000}{300} = 50$ ohms (inclusive ground connection).

Or, if in this line the full load current is 200 amperes, the impedance voltage of the line 20 % at full load, then the

Digitized by Google

maximum current, which could flow in the line at short circuit (if the generators maintain full voltage), is 5 times full load current, or 1000 amperes effective, that is, about $i_0 = 1410$ amperes maximum. If then the short circuit current is suddenly broken — as a flaring arc is liable to do — the maximum voltage of the transient oscillation would be: $e_0 = i_0 z_0 = 560.000$ volts, that is, far beyond the disruptive strength of the line. Hence while the oscillation produced by lightning may be relatively harmless, the short circuit oscillation of the system, if it occurs, is certain to be destructive. If full load current of 200 amperes effective, were opened at the maximum point of the wave: $i_0 = 283$ amperes, an oscillation could result of a maximum voltage of $e_0 = i_0 z_0 = 113.000$ volts. Thus in the control of high voltage transmission lines, safety requires the use of circuit breakers which are certain to open at zero current, and flaring arcs, by their possibility of rupturing at maximum current, are the most dangerous disturbance of high voltage transmission circuits. This has led to the universal adoption of the oil circuit breaker in high power systems, as it has the cha racteristic to open at zero current.

In underground cables, z_0 is low, and cable oscillations therefore have a low ratio $\frac{e_0}{i_0}$, that is, large oscillating currents flow with moderate voltages. If however such a large oscillating current enters from a cable into an overhead line, in which z_0 is much higher, the voltage e_0 also becomes higher. That is, a high current oscillation, which is relatively harmless in the cable, in which it originates, may become destructive by its high voltage when entering an overhead line, and more so still when entering the high potential coil of the transformer in which z_0 is still much higher. Inversely, an oscillation originating in overhead line or transformer, may become harmless when entering a cable, by greatly dropping in voltage.

The same relation exists between overhead line and transformer: an oscillation originating in the line, endangers the transformer which it enters, by increasing the voltage due to the higher z_0 of the transformer; inversely, the connection of an overhead line to the transformer protects the transformer to some extent against oscillations originating in the transformer, since these oscillations decrease in voltage by entering the line, due to the lower z_0 of the latter, as will be seen later in the discussion of traveling waves.

Digitized by Google

The study of the values of the natural impedance

$$z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

and especially of the relative values of the z_0 of the various circuit sections which are connected with each other, thus is of great industrial importance, in indicating the action which the different circuit sections exert upon each other, in either protecting or endangering each other, and also indicates the relative danger of the oscillations originating in the various circuit sections.

8. — Oscillating current i and voltage e of the double energy transient are in quadrature with each other. During each half wave of current, the voltage reverses, that is, changes from $-e_0$ to $+e_0$ (or inversely), hence changes by $2e_0$, and as C is the capacity, the charge of the capacity during the half wave of current thus is:

$$2e_0C;$$

this however equals the product of the current flowing into the condenser, and the time, during which the current flows. The time is one half cycle, or $\frac{1}{2f}$, and the current has the maximum i_0, thus the mean value $\frac{2}{\pi}i_0$. Thus the charge of the condenser also is: $\frac{1}{2f} \times \frac{2}{\pi} i_0 = \frac{i_0}{2\pi f}$, and it thus is:

$$2e_0C = \frac{i_0}{2\pi f}; \tag{23}$$

substituting herein from equation (21):

$$e_0 = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

we get:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{24}$$

as the expression of the *frequency of oscillation* of the circuit.

Digitized by Google

This expression (24) of the frequency of oscillation directly applies only to a circuit, in which capacity C and inductance L are separately massed. If they are distributed, as in a transmission line or cable, and

L_0 = inductance per unit length of circuit
C_0 = capacity per unit length of circuit
l_1 = length of circuit

the inductances or capacities of the successive circuit elements do not add, as the current and the voltage of the successive line elements are not in phase with each other, but differ by the angle corresponding to the velocity of propagation. That is, if v = velocity of propagation (in overhead circuits about equal to the velocity of light 3×10^{10}), at two points of the line, distant from each other by the length l, the current respectively the voltage differ in phase by the time $\frac{l}{v}$, that is, the phase angle

$$\omega = 2\pi f \frac{l}{v}. \tag{25}$$

Thus, the inductances and capacities of successive line elements must not be added, but combined, and the total effective inductance of the circuit is not: $l_1 L_0$, but is $\frac{2}{\pi} l_1 L_0$, and in the same way the effective capacity is $\frac{2}{\pi} l_1 C_0$.

Substituting this in equation (24), gives as the *frequency of oscillation of a transmission line* or cable of length l_1 the value:

$$f_1 = \frac{1}{4 l_1 \sqrt{L_0 C_0}} \tag{26}$$

or, if the oscillation involves only $1/n$ of the line, that is, the line oscillates in n sections, substituting $\frac{l_1}{n}$ for l_1 in (26), gives the frequency:

$$f_n = \frac{n}{4 l_1 \sqrt{L_0 C_0}} \tag{27}$$

Digitized by Google

and in general, a line oscillation may consist of any combination of waves of various frequencies f_n, which are multiples of a fundamental frequency f_1.

9. — In the preceding, we have considered only the periodic part of the transient. In addition to the periodic transformation of energy between magnetic and dielectric, a gradual dissipation occurs, that is, to the equations (17) and (18) the transient factor $\varepsilon^{-\frac{t}{T}}$ has to be added, where T is the duration of the transient, as discussed in the preceding. This gives the equations:

$$\left.\begin{aligned} i &= i_0\, \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \cos(\Phi - \gamma) \\ e &= e_0 \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \sin(\Phi - \gamma) \end{aligned}\right\} \tag{28}$$

If all the energy were magnetic energy and remained such, the duration of the transient would be:

$$T_1 = \frac{L}{r} \tag{29}$$

and the transient factor would be:

$$\varepsilon^{-\frac{t}{T_1}}.$$

The energy is however magnetic energy only as an average half of the time, that is, the dissipation of magnetic energy occurs only during half of the time, and if there were no other energy dissipation, the transient would last the time $2T_1$. That is, the factor representing the dissipation of magnetic energy, is:

$$\varepsilon^{-\frac{t}{2T_1}}.$$

Half of the time, however, the energy is dielectric energy. If it always were dielectric energy, it would be dissipated in the time:

$$T_2 = \frac{C}{g} \tag{30}$$

Digitized by Google

as it is dielectric energy only half the time, its dissipation is only half as fast, that is, the factor representing the dissipation of dielectric energy is:

$$\varepsilon^{-\frac{t}{2T_2}}$$

and the total transient factor thus is:

$$\varepsilon^{-\frac{t}{T}} = \varepsilon^{-\frac{t}{2T_1}} \varepsilon^{-\frac{t}{2T_2}}$$

$$= \varepsilon^{-\frac{t}{2}\left(\frac{1}{T_1}+\frac{1}{T_2}\right)}. \qquad (31)$$

That is, the duration of the double energy transient, T, is the harmonic mean of the duration of the magnetic transient,

$$T_1 = \frac{L}{r},$$

and the duration of the dielectric transient, $T_2 = \frac{C}{g}$:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{T_1}+\frac{1}{T_2}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{r}{L}+\frac{g}{C}\right). \qquad (32)$$

This quantity is usually represented by

$$u = \frac{1}{T}. \qquad (33)$$

As in the circuit with distributed inductance and capacity, as a transmission line, cable, transformer high potential coil etc., the phase of current and voltage changes from point to point by the distance phase angle ω, which represents the velocity of propagation, the transient equations of the circuit are:

$$\left.\begin{aligned} i &= i_0 \varepsilon^{-ut} \cos(\Phi - \gamma \mp \omega) \\ e &= e_0 \varepsilon^{-ut} \sin(\Phi - \gamma \mp \omega) \end{aligned}\right\} \qquad (34)$$

Digitized by Google

hence, by resolving into trigonometric functions of time angle Φ and distance angle ω, give terms of the forms:

$$\left.\begin{aligned} i &= i_0 \varepsilon^{-ut} \cos(\Phi - \gamma) \cos\omega \\ e &= e_0 \varepsilon^{-ut} \sin(\Phi - \gamma) \sin\omega \end{aligned}\right\} \tag{35}$$

where:

$$\left.\begin{aligned} \Phi &= 2\pi ft && = \text{time angle} \\ \omega &= 2\pi f \frac{l}{v} && = \text{distance angle} \\ f &= \frac{n}{4 l_1 \sqrt{L_0 C_0}} && = \text{frequency} \\ u &= \frac{1}{T} = \frac{1}{2}\left(\frac{r_0}{L_0} + \frac{g_0}{C_0}\right) \end{aligned}\right\} \tag{36}$$

and e_0 and i_0 are related by the equation:

$$\frac{e_0}{i_0} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = z_0. \tag{37}$$

These are the equations of the double energy transient of the circuit whith distributed capacity and inductance, that is, of the oscillations and surges of trasmission lines etc.

10. — In equations (35), i and e are in quadrature, that is, the power

$$p = ei$$

is *reactive*, that is, surges or flows first one way, then the other way through any point of the circuit, but the average flow of power at any point of the circuit is zero. That is, the phenomenon is a *stationary oscillation*, or *standing wave.*

If however e and i are not in quadrature, but in phase with each other, that is, follow the equations:

$$\left.\begin{aligned} i &= i_0 \varepsilon^{-ut} \cos(\Phi - \gamma \mp \omega) \\ e &= e_0 \varepsilon^{-ut} \cos(\Phi - \gamma \mp \omega) \end{aligned}\right\} \tag{38}$$

Digitized by Google

we get a transient, in which the average power at any point of the circuit is not zero, and in which power thus flows along the circuit.

Such a transient is a *traveling* wave, or an *impulse*. It carries or transfers energy along the circuit.

Traveling waves frequently precede stationary oscillation and change into them.

Lightning discharges usually are traveling waves.

Traveling waves may have frequencies from a few hundred cycles to many millions of cycles, and in the latter case are very local in extent. If of moderate frequency, they may be observed by oscillograph, and Figure 10 shows the oscillogram of a traveling wave in a compound circuit consisting of step-down transformer and 28 miles of 100.000 volt transmission line. This traveling wave represents the readjustment of stored energy between the two circuit sections, the transformer winding and the transmission line, which precedes the (very low frequency) stationary oscillation, by which the compound circuit dies down after opening the oil circuit breaker. If of very high frequency, such traveling waves may be indicated by a spark gap across a small reactance in series to the circuit, and in the circuit of Figure 10, a traveling wave of about two million cycles is produced by closing the high tension oil circuit breaker and starts from it, but dies out within a very short distance.

In circuits comprising sections of different character, as transmission line, transformer, load, etc., that is, in most industrially important circuits, the energy surge is a combination of standing wave and traveling wave. It obviously must die down simultaneously in all circuit sections. In some circuit sections however, as the transmission line, energy dissipation occurs at a greater rate than in other circuit sections, as transformer coils, and the surge would therefore die down more rapidly in the former than in the latter, if the two circuit sections were separate. As they are connected together, energy must therefore be supplied to the line, from the stored energy of the transformer, by a traveling wave, so as to give the same rate of decay.

Thus, if u_1 is the transient constant, that is, $\varepsilon^{-u_1 t}$ the transient factor of one circuit section, as the transformer, and u_2 the transient constant of the second circuit section, as the line,

Digitized by Google

$\varepsilon^{-u_2 t}$ the transient factor of the latter; when both are connected together, they must have the same transient factor: $\varepsilon^{-u_0 t}$, where the resultant transient constant of the compound circuit, u_0, is a weighted average of the individual transient constants $u_1, u_2 \ldots$ of the circuit section. If then:

$$u_0 = u_1 + s_1$$

$$u_0 = u_2 - s_2, \text{ etc.,}$$

the common transient factor $\varepsilon^{-u_0 t}$ of each section consists of the energy dissipation factors $\varepsilon^{-u_1 t}$, $\varepsilon^{-u_2 t}$ etc., and the energy transfer factors: $\varepsilon^{-s_1 t}$, $\varepsilon^{+s_2 t}$ etc., and the latter represent the transfer of energy along the circuit, by a traveling wave. Such energy transfer means a withdrawal of stored energy from the circuit, if $u_0 > u_1$, or a supply of energy (from other circuit sections), if $u_0 < u_2$. In the former case, the traveling wave increases in intensity along its path, that is, an exponential function of the distance of travel l appears, with positive exponent:

$$\varepsilon^{+\frac{s_1 l}{v}}$$

and in the latter case, the traveling wave decreases along its path, that is, the exponential function of distance appears:

$$\varepsilon^{-\frac{s_2 l}{v}}$$

where:

v = velocity of propagation, approximately $= 3 \times 10^{10}$.

The equation of the traveling wave thus appears in the form:

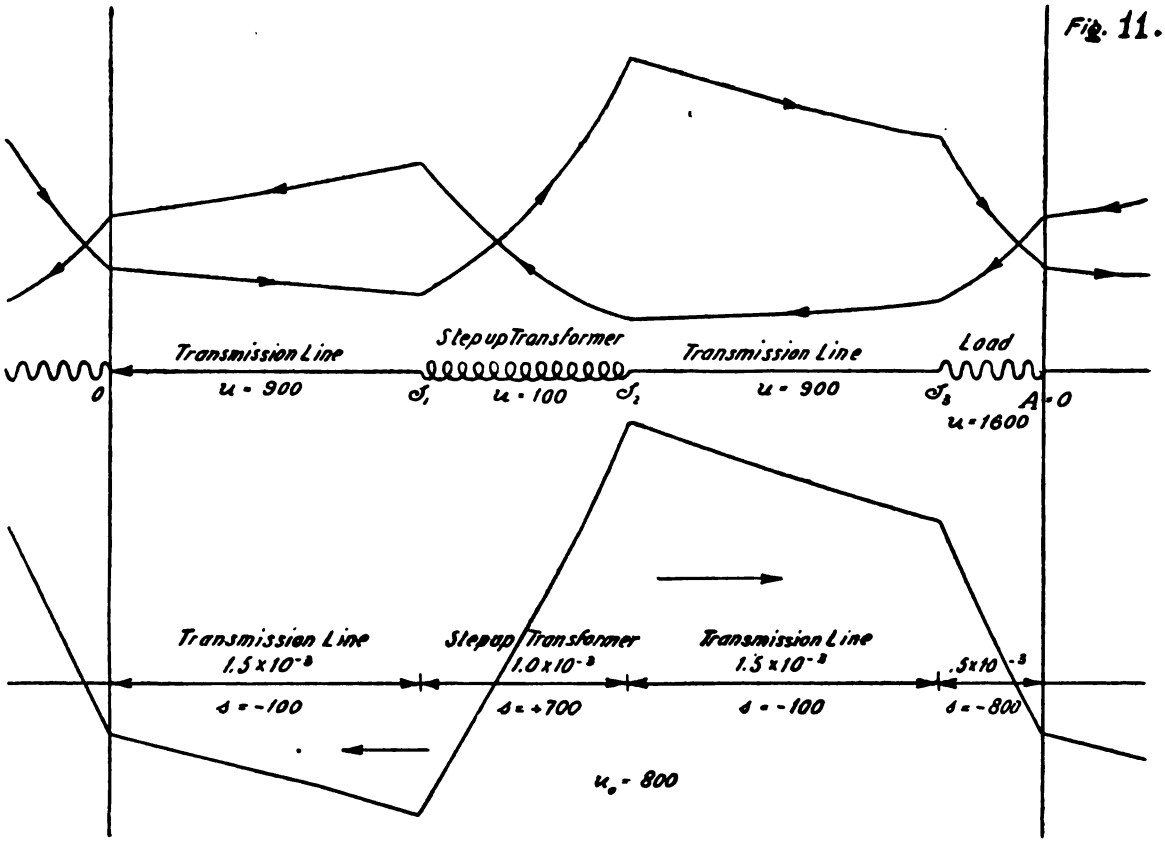
$$\left.\begin{aligned} i &= i_0 \varepsilon^{-(u \pm s)t} \; \varepsilon^{\pm s \frac{l}{v}} \cos(\Phi - \omega - \gamma) \\ e &= e_0 \varepsilon^{-(u \pm s)t} \; \varepsilon^{\pm s \frac{l}{v}} \cos(\Phi - \omega - \gamma) \end{aligned}\right\} \quad (39)$$

Digitized by Google

where:

$$\left.\begin{aligned} u &= \text{transient constant of the respective circuit sections,} \\ u \pm s &= u_0 = \text{resultant transient constant of the entire circuit.} \end{aligned}\right\} \quad (40)$$

Thus a stationary oscillation of a compound circuit consists



of traveling waves which transfer energy between successive circuit sections, feeding energy from the section of lower dissipation constant. into the section of higher dissipation constant, by equation (39). The calculated potential distribution of a stationary oscillation of a closed compound circuit is illustrated diagrammatically in Fig. 11, and also separately the two component waves, which traverse the circuit in opposite direction.

Digitized by Google

In the same manner in a uniform circuit, if a local piling up and scattering of stored energy occurs, as in a lightning discharge, the transient factor of distance appears, that is, the traveling waves have the form:

$$i = i_1 \varepsilon^{-(u+s)t} \varepsilon^{+s\frac{l}{v}} \cos(\Phi - \omega - \gamma_1) +$$

$$+ i_2 \varepsilon^{-(u-s)t} \varepsilon^{-s\frac{l}{v}} \cos(\Phi - \omega - \gamma_2) \text{ etc.} \qquad (40)$$

11. — In the energy surge or transient of a compound circuit, a flow of oscillating power thus occurs between the circuit sections. This results in a trasformation of voltage and current at the transition points between the successive circuit sections.

For instance, if a traveling wave passes from a transmission line into the high potential winding of a step-down transformer, and e_1 is the maximum voltage, i_1 the maximum current, hence $p_1 = \frac{e_1 i_1}{2}$ the mean power of the wave in the transmission line, and e_2 the maximum voltage, i_2 the maximum current, hence $p_2 = \frac{e_2 i_2}{2}$ the mean power of the wave in the transformer, the same power must leave the line, which enters the transformer, that is, it must be:

$$e_1 i_1 = e_2 i_2 \qquad (41)$$

e and i are however related by the natural impedance of the circuit section, that is:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \frac{e_1}{z_1} \\ i_2 &= \frac{e_2}{z_2} \end{aligned}\right\} \qquad (42)$$

where:

$z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ is the natural impedance of the line, $z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$ the natural impedance of the transformer winding.

Digitized by Google

Substituting (42) into (41) gives:

$$\frac{e_2}{e_1} = \sqrt{\frac{z_2}{z_1}} = \frac{i_1}{i_2} . \qquad (43)$$

That is:

At the transition point between two circuit sections, a transformation of voltage occurs, with a transformation ratio, which is the square root of the ratio of the natural impedances of the two circuit sections, and a transformation of current by the inverse ratio.

This relation between the oscillating voltages and currents of different circuit sections is of fundamental importance in tracing the origin and determining the destructiveness of disturbances.

A traveling wave, coming from one circuit section into a circuit section of higher natural impedance thus increases in voltage and thereby in destructiveness, and inversely, when entering a section of lower natural impedance, it decreases in voltage.

This explains why electric disturbances, which originate in one circuit section, frequently develop their destructiveness in adjoining circuit sections, in which, due to the higher natural impedance of the latter section, they have increased to destructive voltages. The result, and the indication of a transmission line disturbance thus often is the break down of the transformers connected to the line, not, because the transformers are weaker in insulation, but because the disturbance, while of harmless voltage in the line, has increased in voltage in the transformer.

This voltage transformation at a transition point means that the wave crests of the voltage distribution in the one circuit section are higher than in the other circuit section; at the transition point itself, obviously both circuit sections have the same voltage, and the potential distribution of the traveling wave thus is somewhat like shown in Figure 12. At the transition point a change of phase angle occurs, and in the circuit section of higher voltage maximum, this maximum occurs nearly a quarter wave length distant from the transition point. How far this distance is, depends on the frequency: with a very high frequency traveling wave, the wave crest may occur within the end turn of the transformer, which the wave enters, while

Digitized by Google

with a moderate frequency wave, it may be near the center of the transformer. The location of a break down in a transformer, whether in the end turns or in the middle of the winding, thus

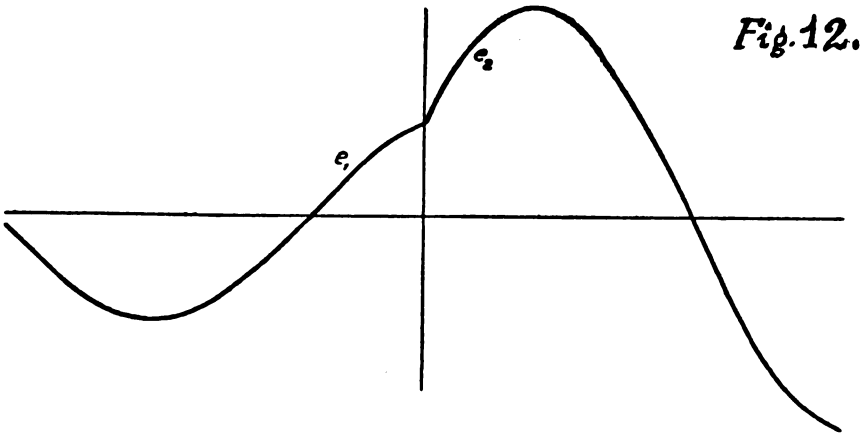


Fig. 12.

does not indicate, whether the disturbance entered from the outside, or originated in the transformer, but a transformer may break down in the middle of its winding, by a moderate frequency traveling wave, which entered it from the transmission line.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

L'Auteur commence par rappeler quelques-unes des propriétés du courant électrique.

Quand un courant électrique parcourt un circuit, il y a dissipation d'énergie par suite de la résistance de ce circuit. En outre, dans l'espace qui entoure le conducteur parcouru par le courant, il se forme un champ magnétique *et un* champ diélectrique.

Des forces existent dans ces deux champs, qui sont capables de mouvoir les corps situés dans leurs zones d'influences; ces champs sont des sièges d'énergie; il y a donc, dans l'espace qui entoure un conducteur parcouru par un courant, une véritable accumulation *d'énergie sous deux formes distinctes: l'énergie magnétique et l'énergie diélectrique. Cette production d'énergie constitue le phénomène essentiel qui accompagne, dans un conducteur parcouru par un courant électrique, la dissipation d'énergie due à sa résistance.*

Le champ magnétique est proportionnel à l'intensité du courant, et le facteur de proportionnalité a été appelé inductance (*L*). *Le champ diélectrique est proportionnel à la tension, et le facteur de proportionnalité a reçu le nom de* capacité (*C*).

Toute variation dans les conditions du régime d'un circuit électrique, impliquant une variation dans l'énergie accumulée, doit avoir pour conséquence une période transitoire, pendant laquelle l'énergie accumulée varie de la première à la seconde valeur, augmentant ou diminuant, et pendant laquelle aussi l'énergie abandonne le circuit pour envahir l'espace qui l'entoure, et rentre ensuite de l'espace dans le circuit.

L'auteur appelle " transient „ électrique le phénomène temporaire qui se manifeste alors que, pendant un changement des conditions d'un circuit, l'énergie magnétique et l'énergie diélectrique accumulées varient pour s'adapter aux nouvelles conditions du circuit.

Ce phénomène n'est pas particulier au courant électrique; on le constate dans tous les systèmes où il y a accumulation d'énergie, soit elle électrique, mécanique, thermique ou autre.

Digitized by Google

L'énergie peut être accumulée sous une seule forme ou sous plusieurs; l'Auteur en donne quelques exemples.

Ainsi, dans un train en marche, on a l'accumulation sous une seule forme, celle de la force vive qui peut augmenter ou diminuer. Dans le mouvement d'un pendule, on a l'énergie sous deux formes, la cinétique et la potentielle, qui se transforment l'une dans l'autre. Dans la décharge d'un condensateur, on a l'accumulation de l'énergie électrique et de l'énergie magnétique, et encore la transformation de l'une dans l'autre.

L'Auteur distingue les " transients „ en périodiques et en apériodiques. Toutes les fois qu'il y a transformation de deux ou de plusieurs formes d'énergie, le phénomène est généralement périodique: dans le mouvement d'un pendule, par exemple, ou dans la décharge d'un condensateur, etc.; c'est seulement dans quelques cas spéciaux, où les constantes du système prennent certaines valeurs déterminées, que le phénomène devient apériodique.

Dans le cas d'un circuit électrique, l'Auteur distingue encore deux classes de " transients „:

a) *Le " transient „ de forme simple d'énergie, qui est celui qui se manifeste dans le circuit, où l'énergie n'est généralement accumulée que comme énergie magnétique, et où le " transient „ n'est autre chose qu'une augmentation ou une diminution de cette énergie accumulée;*

b) *Le " transient „ de forme double d'énergie, ou l'accumulation simultanée de l'énergie magnétique et de l'énergie diélectrique, où les variations d'énergie accumulée, s'accompagnent de la transformation de ces formes d'énergie l'une dans l'autre, laquelle transformation est généralement périodique.*

Partant de ces considérations, l'Auteur examine les cas qui peuvent se présenter en électrotechnie sous l'influence de ces deux classes de " transients „.

A l'égard de la première classe, il considère les phénomènes consécutifs à l'ouverture et à la fermeture d'un circuit, et aux variations de la tension sur les circuits à basse tension d'une distribution d'éclairage ou d'une ligne de traction, où l'énergie électrique emmagasinée étant négligeable, on peut retenir que l'énergie accumulée n'est que de l'énergie magnétique. Ces " transients „ n'ont que rarement une importance quelconque, en ce sens que leurs effets d'induction sont faibles, et ne mettent en jeu qu'une petite quantité d'énergie qui est rapidement dissipée.

Les " transients „ de la seconde forme se manifestent sur les circuits à très haute tension — de plus de 30.000 volts — où l'énergie emmagasinée n'est plus négligeable. Dans ces circuits, la transformation d'une des formes de l'énergie dans l'autre s'opère avec une grande rapidité, et est apériodique, quand la dissipation de l'énergie dans le circuit est

Digitized by Google

rapide; elle est au contraire périodique et se produit lentement, lorsque la dissipation est lente.

L'Auteur définit ensuite l' " impédance naturelle „ *d'un circuit, qui est une constante* $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$, *de la nature d'une impédance, et qui permet d'étudier les perturbations et les oscillations qui se produisent dan les circuits mixtes, en partie composés de lignes aériennes et de câbles souterrains, avec des transformateurs en action. La détermination des valeurs de cette constante, par rapport aux diverses parties d'un tel circuit, est d'une grande importance, car elle indique l'action que ces diverses parties exercent les unes sur les autres, soit qu'elles se protègent réciproquement, soit qu'elles se nuisent. Elle indique, par conséquent, le danger relatif des oscillations qui ont lieu dans les diverses sections du circuit considéré.*

Après avoir donné les équations des " transients „ à double forme d'énergie dans les circuits qui ont une capacité et une selfinductance uniformément réparties, c'est-à-dire les équations des oscillations et perturbations dans les lignes de transmission, l'Auteur considère les cas où les " transients „ constituent des ondes stationnaires, sans transport d'énergie, et ceux, comme, par exemple, les " transients „ produits par les décharges atmosphériques, et dans lesquels des ondes peuvent se produire, en se propagant le long du circuit, avec transport d'énergie, d'un point de celui-ci à un autre.

Dans les lignes ordinaires de transmission, composées de sections de diverses nature (circuits mixtes) où il y a dissipation d'énergie et dans lesquelles des transformateurs statiques sont insérés, on peut considérer les ondes comme une superposition d'ondes stationnaires et d'ondes en mouvement, avec transport d'énergie d'une section à l'autre du circuit. Ce transport se résout en un changement de tension et de courant aux points de passage des sections successives, et voici la loi de ces changements:

Aux points de passage d'une section à la section successive d'un circuit, le changement de tension est dans le rapport des racines carrées des impédances naturelles des sections, et le changement de courant dans le rapport inverse.

L'Auteur conclut en indiquant combien est fondamentalement importante cette propriété pour la recherche de l'origine et la détermination du degré de destructibilité des perturbations.

Digitized by Google

Protective conditions of Electrical Apparatus in America.

E. E. F. Creighton (Schenectady, N. Y. - U. S. A.).

In this brief review, it will not be possible to give a detailed analysis, either of all the known subdivisions of the classes of surges which injure electrical apparatus, or of the manufacturing details of the types of protective apparatus in use. There are however a few main divisions of electrical surges that predominate and are especially important to differentiate, and there are correspondingly general types of protective apparatus that are applicable to give degrees of safety for each of these divisions.

This treatment has, somewhat, the requisite view point of the manager of an electrical power company, who has to decide how to choose the equipment and apparatus to fit his particular conditions of operation. In the absence of absolutely unbiased and authoritative statements as to what to do, it becomes just as important, in order to avoid expensive mistakes and experiments, to know some of the things not to do. Some of the things that should be avoided are represented in the history of the development of protective apparatus. Many, perhaps one might say most of the errors have been more of omission than commission. The multiplicity of factors that enter the problems of protection were not at that time even known to exist. Even, to-day, while the main problems of protection have a satisfactory workable solution, there are still hazy notions of certain practical points to be cleared up, and there is much in the realm of theory, especially in regard to atmospheric changes, which has scarcely been touched.

It is the nature of the human mind to make things easy by generalizations and rules. In the application of the protective apparatus, this tendency has led to misapplication of several good principles in physics. For example, an investigator or engineer in looking through the mathematical equations of electrical surges, finds that an electrical oscillation is dampened out

Digitized by Google

in the shortest time possible by utilizing a value of resistance in series, known in the mathematical literature on this subject, as the " critical value „:

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

The resulting lightning arrester involving this principle gives a high degree of protection to one class of surges and a low degree to others. The frequent failure of such an arrester was no reflection on the truth of the physical law, but the conditions in the arrester which satisfied this law did not meet the requirements of other factors and forces which existed simultaneously in the same circuit.

Again, another engineer notes that a resistance somewhat greater than the " critical resistance „ brings the potential of the surge to zero in a shorter interval of time than would the " critical value of resistance „.

An application of this principle led to more frequent failure to protect the electrical apparatus than the lesser resistance. Both principles are good for certain conditions, but they are not universally applicable. In each case a potent fact has been lost sight of: the insulation of the electrical apparatus can be punctured in an extremely short time. Although both the time to cause puncture and the period of the usual electrical oscillation are so extremely small as to readily fall under the designation *instantaneous* to our senses, yet their difference may be relatively enormous. A comparison is easier to conceive by translating the time factors into more familiar intervals. If the unit time required to puncture the insulation is designated as a *day*, then the time to dampen out the oscillation might be designated in *years*. In the life of a surge the interval of puncture is a moment and soon becomes ancient history.

Still again, another engineer has seen the objectionable nature of series resistance and has decided to use none.

Great success was obtained with arresters built on this principle until, through the natural growth of the electrical industries, the generating apparatus became so powerful as to melt, and even explode, the active parts of the arresters before the arrester could extinguish the dynamic current which naturally followed a lightning discharge to ground.

As still another example of a valuable principle, that has been

Digitized by Google

misapplied by attempting to use it as a universal protector against all sorts of electrical surges, is the absorption of high frequency surges by an electrostatic condenser. It has its advocates both in Europe and America.

In reasonably large units the electrostatic condenser will absorb certain classes of surges admirably. Unfortunately the cost of a desirably large capacity is usually prohibitive, and furthermore such a condenser may introduce another risk by its presence in the circuit. There is always a possibility of resonance between such a condenser and a series inductance in the circuit. When the capacity of such a protector is reduced to an equivalent of two disks five centimeters in diameter separated by about 0,2 mm., as was done by one advocate, the application becomes absurd. The valuable principle of the condenser action depends on its capacity to absorb the charges of electricity in the electrical system without permitting a rise in potential. In other words, the capacity must be comparable in dimension to the quantity of electricity that it should absorb. An elementary calculation will show the impossibility of attaining this end at any reasonable cost at present on circuits of potential high enough to be considered in transmissions of power.

The fallacy in using a small condenser may be illustrated by an analogy. It corresponds to an attempt to force a room full of air into a small bottle without bursting the bottle or even increasing the internal pressure to an unsafe value.

There are several other illustrations of good principles which apply to specific conditions, but which, when involved alone in a lightning arrester, limit its value. No lightning arrester involved all the good principles, therefore as the competitive manufacturing companies failed to get protection with their arresters, they would adopt a new condition of design each year. It has happened that two competitive concerns actually and unwittingly exchanged their principles of designs between lightning seasons. Each realizing their own failures and short comings thought the other must have found the solution.

The problem, as already stated, is many sided. Dr. C. P. Steinmetz, by his work on Transient Phenomena, has undoubtedly done more than anyone else to bring order out of chaos. Up to a few years ago, the designer of lightning arresters labored under an unusual disadvantage. He was designing to meet an unknown condition, to absorb the effect of a phenomenon which

Digitized by Google

came without warning and on one hand, provided it did no damage, disappeared in a thousandth of a second; or on the other hand, it started a small fault which resulted in a gradual distruction of the apparatus.

Subsequently it was found that lightning was not the only cause for electrical surges, and these other sources, not being distinguished from lightning, caused a confusion which put the design out of the realm of engineering.

Still further, insulating materials were employed with but little knowledge of their characteristics or their proper location.

Discussion took place on the design of arresters without distinguishing the factors due to the voltage of the system or the nature of the service, such as, trunk lines, overhead or cable distributions for lighting, power, or railways. Not half the chaotic requirements of design have been mentioned, but contrast these, for example, with the problems of design of a motor. Although such a designe may be difficult and complicated, there was always the definite aim of torque, speed, and heating to be reached. While the variable permeability of iron always caused a degree of uncertainty, it could be met by a change in the mechanical dimensions.

It is the object then of this paper to describe, as best one can briefly, the progress that has been made in putting this branch of electricity on a solid foundation of engineering.

To do this will require several kinds of classifications.

Since these classifications will be made from different points of view, they must necessarily overlap.

To begin the classification, the problems in protective apparatus engineering involve such factors as may be classified under the general headings:

a) Nature and source of electrical surges.
b) Characteristics of insulations and constructions.
c) Characteristics of protective apparatus.
d) Practical and commercial adaptation.

a) Nature and sources of electrical surges.

The first subdivision of surges is the separation of *potential surges* from *dynamic current surges.* Although a surge of potential naturally involves a movement of a charge of electricity, and

Digitized by Google

therefore an electrical current, it is convenient to distinguish this surge current from the heavy dynamic currents, which take place on a constant potential system when an accidental short circuit occurs. Although either may involve the larger value of current and power, there is always a greater energy in the surge of dynamic current. The abnormal dynamic current frequently involves dangerous mechanical strains and heating.

The oscillating currents of abnormal potential surges rarely do any harm in themselves, it is the abnormal value of potential involved which does the damage.

The damage is confined to the dielectric.

As a distinguishing mark the divisions will be designated as A_1 and A^1 and the subdivisions by the corresponding small letters.

Thus:

A_1) Abnormal Potential Surges.

A^1) Abnormal Dynamic Current Surges.

A_1) Abnormal Potential Surges.

The subdivision of this classification will be made with the type of apparatus in view, that should be used to give protection.

The subdivisions are, consequently, not entirely distinct phenomena.

a_1) Lightning.

a_2) Accidental arcing grounds.

a_3) Resonance.

a_4) Cross-dynamic circuits.

a_5) Continuous induction.

a_1) *Lightning.*

The nature of the accumulations of static electricity in the atmosphere which cause lightning is still a matter of speculation. Such speculations are outside the scope of this review. There are, however, some observations on lightning, which are valuable in explaining resultant phenomena, and there are a number of *effects* of lightning which are important to note.

The accumulations of static charges in a thunder storm are rapid. It usually happens that a discharge, which appears to the eye as a single discharge, is composed of a succession of discharges. The usual number recorded is from three to seven, although in rare instances more than a dozen distinct successive

Digitized by Google

discharges have been photographed. These separate discharges are due apparently to a readjustment of the charges in adjacent clouds, which produce an accumulation of sufficient potential to discharge into the path formed by the initial discharge. A number of successive discharges have been noted which had an interval of one-quarter second, usually however the interval is much shorter and, consequently, cannot be seen with the naked eye, but must be photographed by a special photographic apparatus. The importance of these observations on multiple strokes lies in designing an arrester which always maintains a complete circuit to ground, and which has an endurance to discharge sufficient to take several discharges without overheating.

Individual lightning strokes are of very short duration. Whether they are oscillating in character is still a mooted question. An any rate, the suddenness of discharge gives the effect of a high frequency discharge. Dr. C. P. Steinmetz's calculations place the possible frequency between one half million and a million cycles per second, and the current of discharge of the average lightning stroke at about 10.000 amperes.

Operators of transmission circuits have often noted that the apparent severity of a storm has little to do with the damage it may do to the transmission line. This is a matter of chance location of the strokes near or far away from the line. By timing the interval between the flash and the thunder, all strokes that take place within a radius of 6 kilometers can, in any storm, be counted. This includes an area of over 100 sq. km. If, for example, there were twenty strokes, it would give an average of only $^1/_5$ stroke per sq. km. The danger zone on each side of a transmission line is still an unknown quantity, but if it is taken as $^1/_2$ km., then the danger zone of a transmission line passing through this lightning territory would include 12 sq. km. By the law of averages the line might, by this approximate method of reasoning, be seriously affected by an average of 2 strokes during a storm of twenty strokes total.

As a matter of fact the number of near strokes to the line in any single storm may be either zero or nearly the total number of strokes, according to the character and location of the storm. The writer has noted two distinct formations of thunder storms, and, although it happens usually that both formations are more or less mixed, still it is a convenience to differentiate between them. There is the inverted cone formation

Digitized by Google

of clouds and the progressive storm. In the inverted cone formation of clouds the lightning strokes all take place around the apex of the cone. If the apex of the cloud cone happens to fall over a transmission line, the effects are numerous and disasterous although the storm may not appear severe to an observer located at some distance. If however a storm moves progressively, the number of strokes in the danger zone along the line will depend on the direction of the path of the storm and the nearness to the line.

The effect of electrostatic induction on the line from lightning is to concentrate a potential at a local point, called the *bolt-peak.* The nearer the line the lightning bolt strikes, the greater the concentration at the bolt-peak. If the potential of the freed charge of electricity on the line is not sufficient to spark over an insulator to ground, it will spread in waves in both directions over the line. As it travels along the transmission line, it will lose more or less of its destructive power according to the conditions of protection along the line. If a station is near a bolt-peak, it will naturally receive a more dangerous blow than if it is far away.

If the induction from ligthning is electromagnetic, as happens rarely, due to horizontal discharges of lightning between clouds, the potential of the induced charge will be greatest at the ends of the line.

a_2) *Accidental Arcing Grounds.*

The usual location of an accidental arcing ground is at an insulator, a cable joint, transformer bushing, or a generator coil. When one phase of a non-grounded neutral three phase system is grounded at the peak potential of its wave, the other phases rise from the value of Y potential above ground to Delta potential. Since this change is sudden, the potential will overshoot its normal value, and may rise easily to a value of the Delta plus Y potential. This is about 1.6 times Delta potential and 2.5 times Y potential. This is not a dangerous potential on a normally insulated system. However it frequently happens that the sudden adjustment of the electrostatic charges involve frequencies which find a responsive resonance in some part of the electrical system. The potentials then amount to values dangerous to the insulation. There is a natural tendency in arcs of

Digitized by Google

certain lengths and certain currents to magnify every harmonic or other super-imposed frequency, such as, for example, the natural frequency of some part of the system. It has been repeatedly noted that an accidental arc may be sustained for a long time at one part of a system without causing any visible damage to the insulation elsewhere, but during some other trouble, when the accidental arc occurs at some other place on the system, it results in the immediate destruction of the insulation on one of the other phases and a consequent short-circuit. In brief, more or less resonance is caused according to the particular location of the arcing ground. Some electrical systems are very much more sensitive to arcing grounds than others.

a_3) *Resonance.*

Since every combination of capacity and inductance in series has its definite frequency of natural oscillation, it sometimes happens in a circuit that damage to the insulation occurs due to the impression of the corresponding frequency. The harmonics in a generator wave are, apparently, seldom strong enough or of high enough frequency, to be the source of the electrical energy for resonance. The most prolific source is an arcy of an kind in the circuit, such as an accidental arcing ground in a non-grounded neutral circuit, a broken line wire in an open Delta circuit, and an electric arc furnace. The conditions of resonance in a transformer or generator, where there is both distributed and concentrated inductance and capacity, are too complicated to analyze mathematically, but it can easily be done experimentally. Mr. E. F. Alexanderson has designed a generator to give 200.000 cycles. By rectifying the current by means of a mercury arc, and passing it through a transformer, it is possible to obtain 400.000 cycles. The writer investigated the cause of numerous failures in a 350 KW. 11.000 volt transformer with a 100.000 cycle machine, and found a dangerous condition of resonance at 90.000 cycles per second. With three flat coils side by side in series, the potential would not only rise to a high value on the middle coil, but would also concentrate locally at certain points of the winding. At these high frequencies ratios of transformation are no longer proportional to the number of turns on the primary and secondary. A standard lighting transformer with a ratio of 20 to 1 in the winding gave a ratio of potential

Digitized by Google

of 80 to 1 at the resonant frequency. Another transformer with a ratio of 1 to 10 gave a ratio of 1 to 1. This transformer had ten coils on the secondary. Each coil had induced in it a different value of potential. In one case a single coil had more than ten times the voltage its hould have had according to the ratio of turns on the primary and secondary. In figures, the ratio of turns was 1 to 1 while the ratio of potentials was about 1 to 10.

a_4) *Cross-dynamic Circuits.*

Illustrations of cross-dynamic circuits are given in the following list: a metallic contact between a high potential series arc-lighting circuit and a distribution circuit for incandescent lamps; a cross between a telephone circuit and either a trolley circuit or a series arc-light circuit; a 2300 volt circuit and 110 volt circuit; a 100 K. V. circuit and a 13 K. V. circuit beneath it, and so on.

a_5) *Continuous Induction.*

Cases of continuous induction are found in the operation of wireless transmitters and in telephone lines situated under or near electric power lines of high potentials. The wireless transmitter may put surges in a power transmission system, either by backing up through the transformer which furnishes power to the oscillating circuit, or by the influence of the emanated Hertzian waves on the connecting wires of transformers and meters. Resonance of the power circuit with the wireless waves is usually necessary to cause destructive potentials. An investigation illustrates this fact. An insulated wire 10 meters long was placed in the neighborhood of a wireless antenna. When one end of this wire was touched directly to an earthed conductor, a faint spark could be seen, when the wireless antenna was alive. With this same insulated wire connected to earth through a helix of 30 turns, 30 cm. in diameter, the potential across the helix sparked viciously over a gap 2.5 cm. long (30 kilovolts maximum value). Fig. 1. Many motor coils and integrating meters have been damaged in the same manner.

A telephone line under a transmission line is continuously subjected to more or less potential strains through both elec-

Digitized by Google

trostatic and electromagnetic induction. When an accident happens, which causes a ground on a phase of the transmission line, the induced potentials on the telephone line become destructive. In a similar manner, when any kind of ground takes

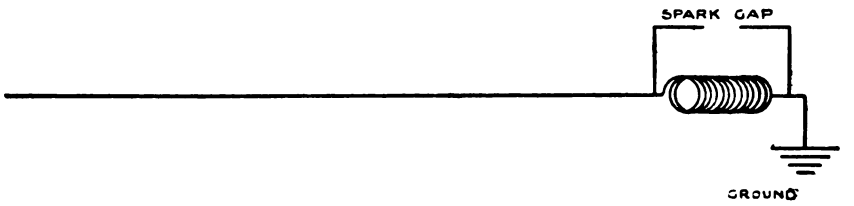


Fig. 1.

place on a high tension transformer, dangerous potentials can be produced on the low voltage side of such a transformer, unless the secondary is grounded, or connected to an electrostatic condenser of much greater capacity than exists between primary and secondary coils of the transformer.

A[1]) Abnormal Current Surges and Short Circuit Effects.

1. *Interruption of Service.*

Since a short circuit shunts the power from some electrical translating device, it necessarily involves an interruption in the flow of either part or all the energy to the device. Usually it causes an interruption of service.

2. *Mechanical Strains.*

The next effect is a mechanical strain on the electrical apparatus which, in a modern power station of large capacity, becomes destructive to coils and generator shafts unless protective devices are used. In the early days of steam turbines the generators were designed with unusually good regulation; consequently the values of short-circuit currents were many times greater than had previously been known. Until precautions were taken the damage caused by an accidental short-circuit was appalling. With a capacity of turbines of several thousand kilowatts back of it, a short circuit in a 100 K. W. transformer

Digitized by Google

resulted in a maze of tangled wires where the turns of the coils were forcibly torn from their supports and thrown apart.

3. *Overheating of Insulation.*

The third effect of a short-circuit has its danger in the heat liberated. Insulation of coils is quickly damaged by the ohmic loss. Live wires are burned in two by the heat of the arcs. In a cable system all the cables in a manhole may be destroyed from a short-circuit on a single cable.

4. *Electromagnetic Impulse of Potential.*

The fourth effect of a short circuit sometimes occurs when the short circuit arc is suddenly extinguished. Under certain unknown conditions heavy current arcs seem to explode. The sudden cessation of the current results in an electromagnetic impulse which raises the potential to abnormal values. These electromagnetic " kicks „ have been measured with the oscillograph on direct current systems.

5. *Abnormal Generator Potentials due to Short Circuits not involving all the phases.*

When, for example, a single phase of a multi-phase generator is short circuited the current in the coils of this phase causes a distorsion of the magnetic field toward the non-shorted phase or phases and an actual increase in the field flux in these phases. The result is that for a short time an abnormally high voltage is generated in the phases that are not short circuited. If there is no load on the generator these dynamic potentials reach dangerous values. If there is a closed circuit on the phases not short circuited the increase in potential causes an increase in the current of these phases and thus gives a counter-magneto-motive-force to the distorting flux in the generator. The voltage is thereby limited. In considering a protective device it is well to note that any such surge is at generator frequency and has an energy limited only by the conditions of generation. The energy in such a surge is incomparably greater than that of an induced lightning stroke. Its power may be equally as great as that of a lightning stroke.

Digitized by Google

Such a trouble results in the loss of incandescent lamps, lightning arresters, etc.

B) Characteristics of insulations.

It is quite as important to study the characteristics of insulating materials as to study the nature of the potentials which cause their failure. While it is impossible here to treat in detail the analysis of the many kinds of insulation in current use, it is, however, feasible to point out briefly certain general characteristics which are important from the standpoint of protection. The most important factor to note is the dielectric-spark-lag. Perhaps next in importance is the self-repairing quality. The dielectric-spark-lag is the interval which elapses between the application of the potential and the actual puncture of the dielectric. For the convenience of the present analysis insulating materials are divided into four classes, viz., (b_1) air, (b_2) oil (liquid), b_3 porcelain (solid), and (b_4) other solids.

The dielectric-spark-lag of air is very much less than oil, the former being of the order of micro-seconds and the latter, milliseconds. This relatively high value of dielectric-spark-lag gives oil a predominant value in insulating against lightning strokes which are of short duration. This characteristic of oil makes it an objectionable material to use in the discharge path of a lightning arrester.

Both oil and air are self-repairing after a dangerous potential strain is removed. Free air recovers its insulating properties almost immediately, while oil may require a second or more. A number of rapid electrostatic discharges on a film of oil will cause a puncture where the same discharges with a greater interval of time between them will not.

None of the solid insulations has the quality of self-repair. They are all more or less subject to what may be called *cumulative damage*. In other words these insulations are damaged by transitory discharges which are insufficient to puncture in one stroke. The damage done by a stroke is cumulatively carried into the successive strokes. The condition is somewhat analogous to the mechanical operation of driving a nail through a board by a number of successive strokes. Good porcelain, glass, and like substances, seem to be very slightly subject to *cumulative*

Digitized by Google

damage, either they puncture or retain their dielectric strength. On account of the fact that " singing insulators „ (that is, insulators having a heavy static leak which shows itself in brush discharge) would remain on a line for years without failing, it was concluded that these materials had no " fatigue „. However, where the potential gradients become excessive as occur in line potentials above 100 K. V. even porcelain shows a condition of gradual deterioration. A number of pressboards, varnishes, paints, and the like, all sohw gradual deterioration under static strains sufficiently high to cause brush discharge. It may require months or years, according to the conditions, to cause a noticeable weakening. In high altitudes the rarefied atmosphere permits of so much brush discharge that the use of generators wound for even 13.000 volts become problematical. There is a growing tendency to recommend in general a lower limit of potentials for generators and obtain higher potentials by transformation. From a protective standpoint this is to be highly recommended. Transformers can be more easily and better insulated than generators.

There is much of value in considering the nature of the various grades of porcelain and also in avoiding air pockets in all insulating materials. In many cases impregnation becomes of extreme value not only on account of the dielectric strength but also on account of firmness of mechanical structure. A modern generator coil of good design is a work of art and it requires several months to complete it.

B[1]) Distribution of Insulation.

Only two features of design will be herewith considered, viz., " end turn insulation „ and the dimensional relations of the parts of an insulator.

As an aid to protective devices it has been the practice for a number of years to place extra insulation on the turns of the coils nearest the terminals of high tension transformers. Even in ordinary switching nearly full potential of the terminals may exist momentarily on the end turns of a coil. Since this is an internal effect and does not involve a rise of potential at the transformer terminals above normal operating voltage, it is beyond the province of a lightning arrester to give any protection against such a condition. On the other hand, when ab-

Digitized by Google

normal potentials of lightning strike the end turns of a coil, the extra insulation placed there relieves the lightning arrester of a duty which would be nearly beyond it. Generator design does not lend itself to reinforcement of insulation on the end turns and the generators are, consequently, more difficult to protect against lightning than transformers.

In the design of an insulator the dimensions should be made such that a failure due to the application of high potentials will result in a flash around the porcelain rather than through it. It is not sufficient to determine this condition by the test with gradually applied potentials, because corona streamers give a shorter path around the insulator than exists when the potential is suddenly applied as in the case of lightning. Tests should be made with disruptive discharges.

C) Characteristics of Protective Apparatus.

Some of the most usual protective devices will now be described. In judging the value of a lightning arrester, the most fundamental considerations are: spark potential, the discharge rate of current at a value of potential equal to double normal line potential, endurance to continuous discharge, and the dielectric-spark-lag.

C_1) Multigap Lightning Arrester.

Construction.

The mechanical parts of a multigap lightning arrester consist of a number of brass cylinders spaced about $^1/_{32}$ (0.8 mm.) apart in combination with various values of resistance. In multigap arresters of the highest efficiency, the resistances are used in shunt with groups of gaps (fig. 2). In the first path of the lightning, there is placed a high resistance (R) and the minimum number of series gaps (Group G.) which will just extinguish the arc for the value of dynamic current that would flow through the resistance. There is a second path for the lightning passing through a medium value of resistance (M) and the minimum number of gaps ($G_2 + G_1$) necessary to extinguish this greater value of current. There is a third path for the lightning through a low resistance (r) and a still greater number of gaps to ground

Digitized by Google

($G_3 + G_2 + G_1$). There is still a fourth path for the lightning to ground, in which there is no series resistance, but a great many series gaps ($G_4 + G_3 + G_2 + G_1$). The object of this combination

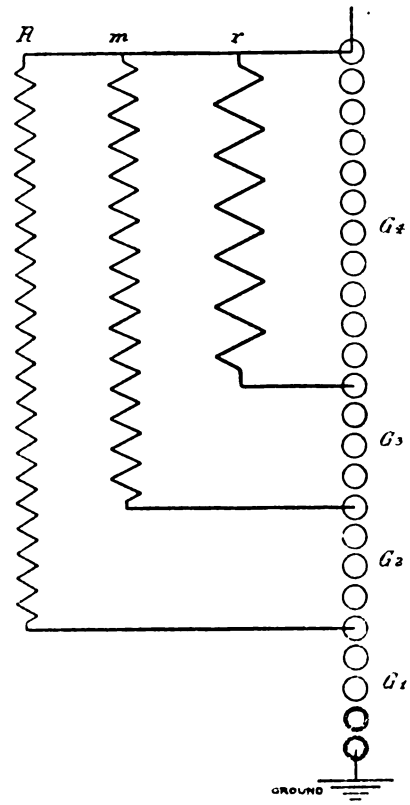


Fig 2.

is to have resistance in series where it is permissible on light strokes of lightning, but have it possible to cut out automatically more or less of the resistance in accordance with the demand of the severity of the lightning stroke.

Theory of Spark Potential.

The theory of spark potential of the multigap arrester was given by Dr. Steinmetz in 1906. When a lightning stroke reaches the terminals of the lightning arrester, all of its gaps do not begin to spark simultaneously: the action is successive. The gap

Digitized by Google

nearest the line sparks and by its oscillation at nearly one billion cycles per second, transmits the spark to the second gap. The oscillation of the second gap transmits the impulse to the third, and so on, throughout the total number of series gaps.

The arrester is very sensitive to high frequency surges, but is somewhat proportionately less sensitive to lower frequency surges, therefore the arrester has no fixed spark potential. A concrete example will illustrate this variation. If 32 gaps, each one $^1/_{32}''$ (0.8 mm.) long, are placed in series, the sum of the gaps is equal to one inch space (2.54 cm.). If high frequency is applied to this series of gaps with a variable needle gap in parallel, it is found that the equivalent-needle-gap may not be greater than $\frac{1}{4}$ (6.35 mm.). If however a uni-directed impulse of potential is discharged through the arrester, it is found that the equivalent-needle-gap approaches 2".

We may now return to the construction of the lightning arrester with its selective paths to explain that the design described is especially chosen to overcome this phenomenon of insensibility of the multigap arrester to low frequency surges. The selective path arrangement also gives a greater endurance to the arrester to withstand rapidly repeated discharges such as come from arcing grounds. The arrester cannot however protect against heavy surges from continuous arcing grounds.

Equivalent-needle-gap.

A needle spark gap in parallel with an arrester is the standard method of measuring the efficiency of the arrester to transitory discharges.

Arc Extinguishing Quality.

After a discharge of lightning takes place through an arrester, the dynamic current on the line almost invariably follows the spark. It is therefore necessary to have a particular quality in the arrester which will extinguish the dynamic arcs before damage results to the arrester by overheating. In the multigap arrester, it is the cooling effect of the brass cylinder on the arcs which extinguishes them. The number of gaps, to extinguish the arcs of a dynamic current, increases as the value of current increases. The extinguishment of the arc takes place when the current passes through zero.

Digitized by Google

Discharge Rate of Lightning Arrester.

The usual design of a multigap lightning arrester gives four different rates of discharge. It is standard practice to designate the discharge rate at double the normal potential in order to give an idea of the protective value of an arrester at the usual dielectric strength of the apparatus. Through the high resistance (fig. 2), the discharge rate may be a fraction of an ampere Through the medium resistance, the discharge rate may be about 20 amperes. Through the low resistance, the discharge rate may be about 200 amperes. Through the gaps alone, there is no resistance to the passage of the lightning current other than the resistance of the sparks.

Endurance.

Since the extinguishment of the dynamic arcs depend upon the cooling effect afforded by the brass cylinders, it is evident that the arcs cannot play indefinitely between cylinders without overheating them and thereby destroying the arc-extinguishing quality. While the time that the current can continue through the high resistance may be counted in minutes, the permissible time of discharge through the low resistance is but a very small fraction of a second.

Dielectric-Spark-Lag.

The time between the application of the potential and the formation of the complete series of sparks in this arrester is, as already indicated above in the discussion of spark potential, variable. For frequencies around a million per second, the dielectric-spark-lag is small enough to easily satisfy the conditions of protection. In lower frequencies the dielectric-spark-lag becomes greater. The writer has shown elsewhere in the proceedings of the American Institute that the dielectric-spark-lag depends inversely on the value of the applied potential. Therefore in the multigap arrester, there is an automatic adjustment which takes place between the three factors, viz., equivalent-needle-gap (i. e. potential), the natural frequency of the surge, and the dielectric-spark-lag.

Digitized by Google

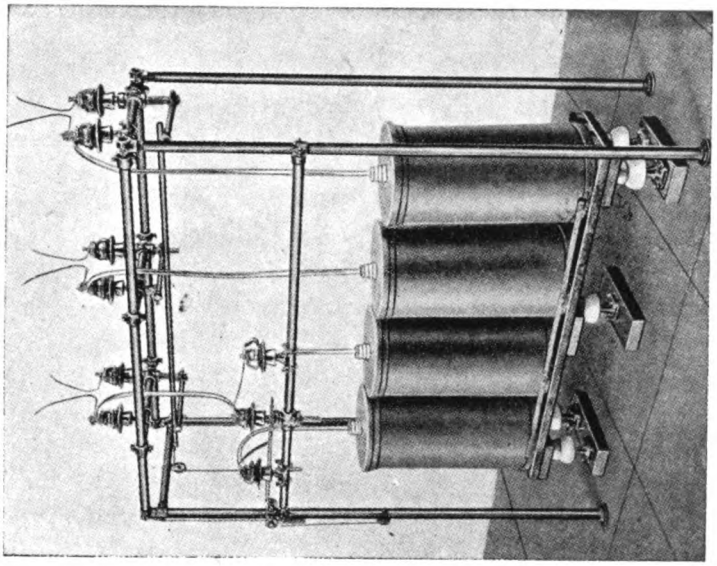


Fig. 4.

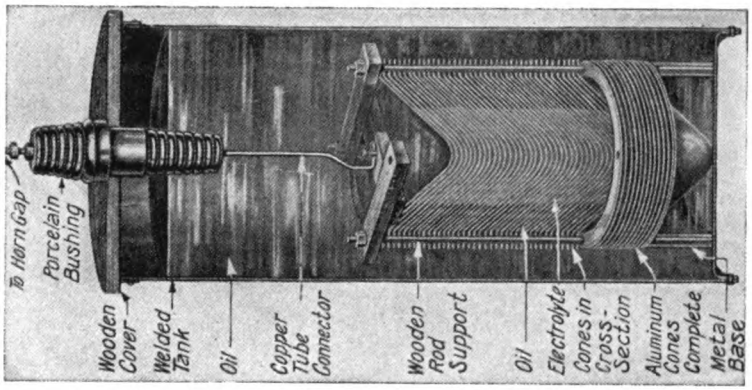


Fig. 3.

E. E. F. CREIGHTON.

Digitized by Google

Digitized by Google

C_2) Aluminum Lightning Arrester.

Construction.

The chief features of the aluminum lightning arrester for alternating currents consist, first, in a stack of inverted concentric aluminum cones with the space of 5 mm. (0.2″) between cones partially filled with electrolyte. Each stack of cones is immersed in oil in an iron tank (Fig. 3). There is a tank for each phase and a fourth tank, connected from the artificial neutral of the three tanks, to ground. Next to the line wire and in series with each tank, is a horn gap (Fig. 4). Each horn gap is constructed as a switch to be closed each day in order to reform a part of the aluminum film that is slowly but constantly being dissolved in the electrolyte. There is also a transfer switch which places the ground stack of cones temporarily in the path of the charging current, so that the electrolytic cells of this group of aluminum cones will be kept in good electro-chemical condition.

Theory of Aluminum Cell.

An aluminum cell, by the electro-chemical action on its plate, forms an inefficient electrostatic condenser. The film has a very particular quality in giving a high resistance to voltages up to about 300 volts effective and of always absorbing this much voltage even when the applied voltage is increased. This action limits the dynamic current to a very small value no matter how high the surge potential. The great valuable intrinsic quality of the aluminum arrester lies in the fact that for all voltages above 300, the resistance of the film apparently disappears, leaving only the low resistance of the electrolyte in series to limit the current of the surges. This action of the film makes it comparable to the action of a safety valve on a steam boiler, or the spill-way of an hydraulic dam. In actual figures, the dynamic current which flows through the arrester is about $^1/_2$ ampere, regardless whether there is lightning or not. This is known as the charging current and it has a low power factor. However, for super-imposed potentials such as lightning and

Digitized by Google

internal surges, the discharge current increases rapidly with the increase of this super-imposed potential above the normal line potential. When these foreign potential reach a value of twice total normal potential, they will cause a discharge through the aluminum arrester to ground of 500 to 1000 amperes, according to the dimensions of the aluminum cells.

Spark Potential.

There is no special theory required for the spark potential of a single horn gap. Its dielectric-spark-lag is a minimum and since the gap is less than any other air gap about the insulation, its lag is less than the dielectric-spark-lag of the dielectrics it is designed to protect. The actual value of the spark potential can be varied at will. The minimum recommended is a potential of about 25 % above the line potential.

Arc Extinguishing Quality.

No special device is necessary to extinguish a dynamic current of $^1/_2$ ampere at a low power factor when the gap setting is slightly above the line potential. The arc cannot maintain itself. In case the dynamic current exceeds $^1/_2$ ampere or the power factor of the current should increase, the arc would rise on the horns; in this case, the elongation of the arc as it rises on the horns extinguishes it.

C_3) Vacuum Lightning Arrester.

For very low voltages, the vacuum type of arrester is particularly adapted. Although the vacuum principle is old in the art of invention, objectionable mechanical constructions have prevented its wide use. With these mechanical objections overcome by new forms of construction, the arrester becomes available for commercial circuits. Its spark potential need not be greater than 300 to 500 volts. Its equivalent-needle-gap is correspondingly low. Its endurance to continuous discharge can be made great enough to fulfill all the usual requirements.

Digitized by Google

C_4) Lightning Choke Coils.

It has been standard practice for many years to use a number of turns of wire in series with the transmission line to aid in the protection of the apparatus. In the case of lightning stroke, this choke coil installed in the leads to a generator or transformer diminishes the potential between the end turns of such apparatus. It has another valuable feature in holding the charge away from the apparatus during the brief interval of dielectric-spark-lag in the lightning arresters.

C_5) Arcing Ground Suppressor.

Construction.

The arcing ground suppressor consists in the main of two parts. First, a *selective relay*, which may operate on either the electrostatic or the electromagnetic principle. Second, a *single phase switch* for each phase, which will automatically connect that phase to ground if so directed by the selective relay. The selective relay picks out the phase on which the accidental arc takes place to ground and causes the corresponding switch to ground the phase and thus extinguish the accidental arc, no matter how far out on the transmission line it may be. In the case of the overhead lines, the switch automatically opens again. Since all insulators should be designed to arc to ground rather than puncture, the line is permanently cleared of trouble by the action of the arcing ground suppressor. If, on the other hand, an insulator should be punctured and an arc should be re-established to ground through the faulty insulator after the first operation of the switch, the suppressor switch automatically closes a second time and remains closed until the operator corrects the trouble.

In the case of the application of the arcing ground suppressor to cable systems, the active suppressor switch remains closed after its initial operation due to the natural condition that a fault from a phase to ground in a cable is necessarily a permanent damage.

Digitized by Google

In either case the arcing ground suppressor has a great value in an electrical system in suppressing the continual surges due to the natural action of an arcing ground.

C_6) Low Voltage Grounded Secondary.

A method of connection on incandescent lighting circuits is finding great favor in the protection of human life and lessening the fire hazard. This consists of grounding one terminal of the incandescent lamp circuit. While it has the disadvantage of always maintaining a voltage slightly in excess of 100 volts between line and ground instead of only one half of that value as in a non-grounded condition, it has the very effective value of preventing a rise of potential above 125 volts when an accidental cross occurs between the primary and secondary circuit of the transformer. Since the primary of such a distribution transformer is usually at 2300 volts, the grounding of the secondary reduces the risk of a fatal shock from such an accident and at the same time reduces the possibility of the formation of a fire from the discharge of the 2300 volt circuit to ground inside the house.

C_7) Overhead Grounded Wire.

Although a wire strung over a transmission line and grounded at every pole gives an increased immunity to the line against lightning troubles, it does not, however, give complete protection. Its value is very little questioned to-day by engineers and its use has become standard practice in all regions infested by lightning.

C_8) Grounded Neutral.

In order to eliminate the surges due to arcing grounds on non-grounded neutral circuits, a limited number of systems have employed the device of grounding the neutral. The advantages and disadvantages of these two methods of connections is too involved to permit adequate discussion in a brief review.

Digitized by Google

While the grounded neutral is permissible and even advisable under certain requirements and conditions of operation, it is evident that when an accidental ground takes place on a grounded neutral system, it must necessarily result in an interruption of service on the particular circuit on which it takes place. On the other hand, if the surges due to an arcing ground on a non-grounded neutral system can be suppressed automatically and the accidental arc extinguished in the same way, the non-grounded neutral system will give the greatest continuity of service. Grounding the neutral of a system converts most of the potential troubles to current troubles.

C_9) Protectiòn of Lines by High Insulation and Corona.

A condition of protection results from the natural growth in the transmission of electric power of the use of high potentials. With the high insulations employed, for example, on 100.000 volt transmission lines, there are comparatively few lightning disturbances which affect the operation of the line. This is due not only to the high value of insulation, but also to the fact that the operating potential of the line wires is in the neighborhood of the corona value. In other words, any superimposed potentials of high value on the line are lost in the corona discharge from the transmission wires. The electrical energy is transferred into the energy of ozone.

C_{10}) Horn-Gap with Resistance in Series.

Since this type of protector is no longer being constructed in America for use on transmission lines, there is little that needs to be said. It is still applied to arc light circuits where the special conditions favor its use. On power circuits the cost and upkeep of a substantial low resistance, and the expense of furnishing multiple paths, combined with its inherent faults, leave it no advantages over the other types.

Digitized by Google

C^{I}) Current protective Apparatus.

Switches.

Switcehs are designed to fulfill two functions. First, the function of convenience in connecting and disconnecting the circuits and, second, the function of emergency safety device. It is only the latter capacity that is of interest in this review.

Except for low potentials, small power circuits, and direct current circuits, the air break switch is not used as an emergency safety device. In general, the oil break switch is used for alternating currents of any considerable power and voltage. The time of operation of one of these oil switches varies greatly with the design. The usual time however, lies between $^1/_4$ of a second and $^3/_4$ of a second. Since the opening of each switch is controlled by a relay, the time interval can be regulated to suit the conditions of operation on the circuit to which the switch is applied. In closing one of these oil switches, it usually requires something like a second for the mechanism to put the switch in a condition to open again. This becomes an important matter under conditions which will be discussed further on.

C^{II}) Fuses.

In the three types of fuses, namely, the bare fuse wire, surrounded fuse wire, and the expulsion type, each has its particular use.

The bare fuse wire and the surrounded fuse wire (usually called the cartridge type) are limited to low potentials. The expulsion type of fuse, however, has found a wide use on high potential circuits. Fuses are limited in their use to emergency devices. Where the fuses are expensive and frequently come into operation, it is evident that an automatic switch will perform the same function better and cheaper than the fuse. There is a considerable time element usually in the opening of a circuit by a fuse, even on short circuits. This is due to the energy required to melt and vaporize the fuse metal. On account of the proportionally greater amount of energy required to vaporize

Digitized by Google

the metal than is required to melt it, the blowing of small fuses in series with large ones is liable to cause more or less deterioration of the larger fuses. Faults thus developed in a large fuse will make its operation unreliable, causing it, at times, to open the circuit under a normal load.

*C*III) Choke Coils as Protectors against Short Circuit Currents.

On large electrical systems, it is found necessary to use series choke coils to limit the current in cases of accidental short circuits. The conditions have already been described in a previous paragraph. In the construction of these choke coils, no iron is used. The iron would saturate at high values of current and thus by its loss of permeability become useless at a time when it is most needed. Furthermore, the iron would give to the coil an objectionable value of inductance at normal loads.

D) Practical and Commercial Adaptation.

Nature of the desired protection.

The desiderata in electrical protection, its application covering a range of potential from the signal arrester, with one volt applied, to the latest design of power transmission circuits at 140.000 volts applied, varies greatly. A fundamental classification can be made under four principal heads:

1. Protection of continuity of service.
2. Protection of the electrical apparatus.
3. Protection of human life from electric shocks.
4. Protection against fire risks.

It happens that every piece of protective apparatus involves, either directly or indirectly, two or more of these factors. Even the simple lead fuse which is designed primarily to prevent overloading an electrical apparatus and therefore falls under the second head, may also operate to eliminate the fire hazard. Indirectly, a fuse may be caused to melt, at times, when a cross occurs with a high potential line and thereby give protection to

Digitized by Google

human beings, and also, indirectly, by disconnecting a faulty branch of an electrical system, it protects the continuity of service on all the unaffected branches.

The foregoing classification is most valuable in the consideration of the operation of protective apparatus under the varied demands brought about by different kinds of troubles. This feature will be evident in discussing specific application such as to telephones, signals, wireless, railways, distribution, transmissions, etc.

On the technical side it is possible to evolve conditions and apparatus which will give any degree of protection that is desired. There is one great conflicting factor which opposes all our theories and plans, namely, the factor of cost. In connection with this, it is often difficult for the college graduate to realize he has left an educational institution for a strictly commercial pursuit. The first and foremost consideration is to make a profit on the investment. No two installations are exactly identical in their requirements.

Protection really begins with the preliminary plans of a proposed electrical system and involves the subjects of spare apparatus, duplication of bus bars, multiplication of switches, transmission lines, routes, loops, location, etc. The next factor lies in the specification to the manufacturer and the consideration of the bids. So long as bids are within reasonable limits the difference in the interest on the investment is a negligible factor. Reliability is paramount. A manufacturer with the custom of replacing defective apparatus within a reasonable time at its own expense has its engineers busy investigating the types of insulation and their distribution to enable them to produce a machine which will not have its profits of sale absorbed in repair parts on complaints. Two generators, for example, which withstand the same standard tests may differ entirely in their reliability; one may operate for years without trouble and the other lose several coils per year by puncture and burning. The difference lies in the care in insulating parts which are not strained by the standard and accepted methods of test, but which under operating conditions are frequently strained. There is an art in the selection and application of insulating materials. The building of a coil is often a process carried over a period of weeks and months. If an electrical device has internal weakness in the insulation the remedy must, in general, be ap-

Digitized by Google

plied locally. In other words, a protective device which protects the terminals from a dangerous rise cannot, as a rule, prevent local variations in the internal distribution of potential which does not rise even to the value of the potential at the terminals of the apparatus, but still is too great for the insulation where such a potential localizes. This factor is one which, in the future, is going to receive more consideration from the purchaser and there isgoing to be a more definite analysis made of the proper function of particular protective devices and less misplaced criticism. The protective devices are too frequently burdened with the load of their real deficiencies. After all protection is, to-day, quite a matter of cost.

After the best efforts have been made by the designer of the insulation of apparatus, lightning arresters and other protective devices must be considered in limiting the cost, the mechanical weakness, the lack of regulation, and the difficulty in heat dissipation which would result from the excessive use of insulating materials.

When we arrive at the stage of the specific consideration of the protective apparatus such as lightning arrester and the like, taking into account the protection value, the cost and depreciation of the arrester must be balanced by a number of factors. Most of these factors are enumerated in the following list:

1. Total value of the apparatus to be protected.
2. Cost of repair parts.
3. „ „ reconstruction of damaged apparatus.
4. „ „ removal and reinstallation.
5. Interest on extra number of spare parts and spare apparatus.
6. Partial damage to insulation.
7. Loss of revenue during the interruption.
8. „ „ prestige and public sympathy by the interruption.
9. „ „ new business on account of unreliability of service.

These factors will enter the problem to different degrees according to widely varied conditions and types of installations. Each problem should be considered individually. In general, if the arrester is solely to protect the apparatus, it is safe to state that the cost of the arrester should be only a fraction of the cost of the power apparatus. If, however, there is a penalty of any sort on an interruption of service, a fire risk, or human

Digitized by Google

life endangered, a large expenditure for a good arrester is fully justified. Furtermore, hall the nine factors enumerated above must be considered in forming a judgment on the permissible expenditure. In developing protective apparatus it has been the endeavor to construct devices of a cost and efficiency to meet all the varied requirements. The work is still in progress.

The importance of continuity of service of many power consumers is evident by its nature. While a few residences may very occasionally resort to an antiquated candle for a whole evening with nothing more than annoyance, it is quite a different matter in a theatre where a panic may result, in a mine where the cessation of elevators or pump entails serious and fatal consequences, in a factory where machines stop and prevent further work yet the pay of the employees continues, in a department store where enough material can be stolen in a few minutes to equal in value the total monthly bill for electricity, and so on.

Lightning arresters are applicable primarily to the protection of electrical apparatus and near lengths of cable or line, but due to the great concentration of lightning potential on overhead lines and the prohibitive cost of placing a sufficient number along the line to be effective the arresters find no specific application to transmission lines (trolley lines excepted). Therefore the protection of apparatus and lines will be considered separately.

With what has gone before in mind, it must be evident that no hard and fast rules can be given which cover the subject of protection in general, and in the following description of specific practices, which are gradually crystalizing into definite form, it should be understood that there may be numerous conditions which might call for a variation from the general recommendations. With this apology for the sacrifice of accuracy to brevity, the subject will be treated under several specific heads.

Protection of transformers at 30 K. V. and up.

At potentials above 30 K. V. there is at present no available good arrester but the aluminum arrester. The design of a multigap arrester becomes extremely difficult and its spark potential is erratic at higher voltages. Furthermore the cost of the high voltage multigap arresters become greater than the aluminum

Digitized by Google

arrester. Choke coils of an appreciable inductance in series are invaluable.

Protection of transformers at voltages less than 30 K. V. on transmission circuits (not on distribution circuits).

On account of the cost of the auxiliary parts such as tanks, oil, and horns, the cost of the aluminum arresters do not decrease in proportion to the decrease in potential. On the other hand, the cost of the multigap arrester decreases even more rapidly with the proportional decrease in potential due principally to the lesser number of brass cylinders required. The cost is one of the deciding factors in the choice of types. The multigap arrester has the advantage at present in isolated localities where there are no attendants, in that it requires no daily or weekly attention. For the protection against lightning on circuits in which the neutral is grounded the multigap arrester gives excellent results. Where an arcing ground suppressor is not used on a circuit in which the neutral is not grounded the continual surges due to an arcing ground are sometimes severe enough to cause the arrester to overheat and to be more or less damaged. On non-grounded neutral circuits therefore it is better economy in general to make a higher first investment in aluminum arresters. Aluminum arresters always give a higher degree of protection.

Protection of transformers on distribution circuit of 2300 volts and higher.

In practically all cases these transformers are inaccessible except to a lineman and therefore aluminum arresters, requiring attention, are not applicable. Furthermore the cost of the aluminum arrester is too high to allow it to be applied to these isolated transformers. All the conditions are favorable to the use of the multigap arrester. Its cost is low and it requires little or no attention. At 2300 volt surges from arcing grounds are of less consequence than on higher potential circuits. The factor of safety in the insulation of these distribution transformers is extra high. The test potential is 10.000 volts on a 2300 volt transformer. Therefore the spark potential of the multigap arrester may be adjusted to a value above the usual

Digitized by Google

surge of an accidental arcing ground and still give ample protection to the transformers against induced lightning. The use of a grounded neutral in these distributing circuits has among its advantages a lesser cost of arresters and ground connectors, while, as a disadvantage, an accidental ground may burn itself into a short-circuit, although at this potential, wood is usually dry enough to give insulation during the period of accidental contact.

Protection of Power House, Generators and Transformers.

Electrical apparatus on individual customer's premises have necessarily less monetary value than the generating apparatus at the power house or main substation that feed the total number of customers. Also, an interruption of service to an individual customer must, in general, be proportionately less harmful and objectionable both to the electric company and community than a general interruption. With these factors in view in selecting a lightning arrester for power house it is evident that the cost of the protective apparatus sinks into relative insignificance and the important requirement becomes reliability. The aluminum arrester is preferable.

Protection of 110-volt - 250-volt Service Circuits.

The shorter the length of exposed wires to lightning, the less the liability of trouble from ligthning. Overhanging trees, houses of greater height than the line, and other similar conditions, still further diminish the possibility of serious lightning induction. There are other factors not given, but it is sufficient to state that lightning is exceedingly infrequent on service wires. The greatest hazard lies probably in crosses with the high tension circuit. Damage can be guarded against in this case by the use of a new type of arrester, but, in the absence thereof in the past, it has become the practice in many cities to ground one wire of the lighting circuit. In some places meters have been lost by surges from accidental short-circuits. It is sometimes found profitable in a large building to pay more for arresters than the price of the meter in order to avoid the loss of revenue during the days or weeks that the meter is inoperative.

Digitized by Google

Protection of D. C. Railways.

In the power house the best possible protector should be used. The best known protector is the D. C. Aluminum Arrester directly connected between the line and ground without the intervention of a gap. The cost and relatively large upkeep are of less importance than reliability of protection. On cars the practice still is standard to use arresters, made up of small gaps in series with a low resistance. The magnetic blowout type requires a minimum of attention and the deterioration is small. A thorough test has been given the aluminum arresters on cars and has resulted in permitting a large system to operate through every storm with no losses of armatures where heretofore it was necessary to interrupt the service by pulling down trolley poles and disconnecting the generators during the storms. Even with that precaution scores of armatures were formerly lost during a season. In severe lightning infested localities the losses of revenue and equipment warrant the extra initial cost and expense of the deterioration of the d. c. aluminum arrester. In localities where lightning is infrequent a gap type of arrester is to be preferred. Again it becomes a matter of judgment in each particular case. Along the trolley lines it is standard practice to place two to four arresters per mile. The fact that these arresters give a considerable protection to the line itself is incidental, their chief function is to remove lightning charges from the line to relieve or, at least, to diminish the strain on the car arresters. Where a gap type of arrester is used on a car the line arresters become extremely helpful and important.

In equal importance to an arrester on a car is the method of wiring. Trolley busses and ground busses must not be placed in the same cable or even near the cable containing the control wires of the motors.

Protection of various low voltage circuits such as Automatic Signals for Steam Railways, Telephone and Telegraph Apparatus.

These systems have some conditions in common, such as low dynamic energy and insufficient potential to maintain an arc. While this lack of electrical energy eliminates one of the factors of difficulty in other arresters, new problems arise to make up

Digitized by Google

for it. Insulations to be protected are weak and spark potentials should be low. The electrodes of the gaps of arresters tend to fuse together. This is fatal to a signal arrester as it produces a false safety-signal to trains. In a telephone circuit the arrester must be sufficiently robust to take a cross with a trolley circuit and clear the customer's telephone apparatus from the line. It must also take a cross with an arc light circuit and eliminate the fire risk. Great progress has been made during the past year in meeting these and other imposed conditions.

Protection of Transmission Lines.

First and foremost in the protection of transmission lines comes the choice of an insulator. The line insulators should have a liberal factor of safety against abnormal potentials. Such an insulator costs much more than one with a small margin of safety, but taking into account the cost of right of way, the poles or towers, the wires, labor, etc., the percentage increase in total cost due to a choice of better insulators is more than justified by the improvement in service. Furthermore, in a lightning infested country, the higher potential insulators will pay for their extra cost after the line is in operation by the lessened expense of patrolling the line and the less frequent need of expensive hurried emergency calls for repairs. Localizing broken insulators and travelling to the place with the necessary repair kit usually absorbs many minutes of time and if the damage is sufficiently great as to cause an unfortunate interruption of power, any reasonable extra expenditure which gives a greater insurance against such an interruption is justified. The broad engineering problem involves the discussion of auxiliary steam power for emergency use, cost of auxiliary trunk lines over an independent route, wooden cross arms, etc., and is out of the scope of a brief review.

Another consideration in the choice of an insulator is the relation between the potential to puncture and the potential to arc around the insulator. This factor is of even greater importance than extra high insulation for the simple reason that if an insulator punctures, it loses its insulating value permanently, whereas, if it arcs around, it can be saved for further usefulness by either an arcing ground suppressor or an immediate, although short, interruption of power. The usual and only test on

Digitized by Google

insulators with gradually applied potential from a generator does not necessarily show up an insulator weak to puncture by lightning. This is due to the fact that corona streamers darting out over the petticoats of an insulator during a gradually applied potential test actually shorten the spark distance around the petticoats. On the contrary a suddenly applied potential as a lightning stroke, must traverse the full distance from wire to insulator pin or take the shorter path through the porcelain.

The third consideration in the protection of transmission lines is the use of overhead grounded wires. If such a construction is not considered desirable, which is seldom the case in lightning infested localities, but always so where thunder storms do not occur, it is still worth while in designing the towers to consider making provision for subsequent installation. The overhead grounded wire is frequently of value in giving mechanical stability and strength to the tower line. At any rate, when the overhead ground wire is used, it must be of good reliable material and well put up. There is no fault quite so disastrous to the service as a broken overhead wire. It may lovingly coil itself around the different phases of the power circuit and leave no free wires for even a crippled service. Bessemer steel has been found unreliable. Stranded wires of open-hearth steel are best. Overhead wires should be grounded at every support. Two separated overhead wires are better than one, but no one at present has been able to state how much better and whether the extra expense is justified.

The fourth consideration is the choice of conductor material. Small amounts of certain impurities in copper cause, finally, a loss of tensile strength. Such wire will break and drop to the ground under the increases in force due to winds or lower temperature. Where the material is irregular or defective, good service is hopeless.

The fifth consideration may be the stringing of the power wires to avoid either swinging together during wind storms by being too loose, or excessive straining during cold weather.

The sixth consideration is the use of a metal guard on the power wire where it is attached to the insulator. The tie wire is often arranged to act in this capacity as a guard against damage by short-circuit arcs. Metal guards are valuable on circuits fed by enormous power, but are usually not necessary otherwise.

Digitized by Google

The only protector to the service as well as to the insulator that is available to-day is the arcing ground suppressor.

Summary.

In *résumé* of the classification of the subjecta of this paper the following skeleton outline is given:

A — Nature & Source of Electrical Surges

- A_1 Abnormal Potential Surges
  - a_1 Lightning.
  - a_2 Arcing Ground.
  - a_3 Resonance.
  - a_4 Cross-dynamic Circuits.
  - a_5 Continuous Induction.
- A^1 Abnormal Current surges or short circuit effects
  1. Interruption of Service.
  2. Mechanical Strain.
  3. Overheating of Insulation.
  4. Electromagnetic Impulse of potential.
  5. Abnormal generator Potential due to a partial short-circuit.

B — Characteristics of insulation (dielectric-spark-lag and self-repairing quality)

- B_1 Materials
  - b_1 Air.
  - b_2 Oil (liquid).
  - b_3 Porcelain (solid).
  - b_4 Other solid materials.
- B^1 Distribution of Insulation
  - End Turns — Air Pockets. / Impregnation.
  - Insulator Design.

C — Caracteristics of some Protective Apparatus

- C^1 Multigap Lightning Arrester.
- C^2 Aluminum Lightning Arrester.
- C^3 Vacuum Lightning Arrester.
- C^4 Choke Coils.
- C^5 Arcing Ground Suppressor.
- C^6 Low Voltage Grounded Secondary.
- C^7 Overhead Grounded Wire.
- C^8 Grounded Neutral.
- C^9 High Insulation, High Voltage, and Corona.
- C^{10} Horn-Gap-Resistance-in-Series.

- C' Switches (Oil Break and Air Break).
- C'' Fuses (Bare, Surrounded, and Expulsion).
- C''' Choke Coils to limit Dynamic Current.

Digitized by Google

D Practical and Commercial Adaptation

- Protection
  - of service.
  - of apparatus.
  - of human life.
  - against fire.
- Cost of Protection versus
  1. Cost of power apparatus to be protected.
  2. „ repair parts.
  3. „ reconstruction of damaged apparatus.
  4. „ removal and reinstallation.
  5. Interest on extra number of spare parts and spare apparatus.
  6. Partial damage to insulation.
  7. Loss of revenue during interruption.
  8. Loss of prestige and public sympathy, due to the interruption.
  9. Loss of prospective customers on account of unreliability of service.
- Protection of some specific conditions
  - Transformers at 30 K. V. and up.
  - Transmission transformers at less than 30 K.V.
  - Distribution transformers 2300 volts, etc.
  - Power House and Station Apparatus.
  - 110-250-volt Service Circuits.
  - D. C. Railways.
  - Various very low voltage apparatus.
  - Transmission Lines.

PARTIAL BIBLIOGRAPHY

Reference Relating to Protective Apparatus & Electrical Surges.

PUPIN, M. I. — Propagation of long electrical waves . A. I. E. E. 1899

PUPIN, M. I. — Wave transmission over non-uniform cables and long air lines . . . . . „ 1900

STEINMETZ, C. P. — Theoretical investigations of oscillations in transmissions . . . . . „ 1901

THOMAS, P. H. — High tension circuits and protective apparatus . . . . . „ 1902

THOMAS, P. H. — The function of shunt and series resistance in lightning arresters . . . . . „ 1902

Digitized by Google

TORCHIO, P. — Safety devices in central stations and sub-stations . . . . . A. I. E. E. 1903
MERSHON, R. D. — The grounded wire as a protection against lightning . . . . . „ 1903
WIRT, H. C. — Protection of high-pressure transmission lines from static discharges . . . . . „ 1904
STEINMETZ, C. P. — High Power Surges... of great magnitude . . . . . „ 1905
THOMAS, P. H. — Experimental Study... Static disturbances caused by switching, grounding, etc. . . . . „ 1905
SMITH, J. C. — Some experiences with lightning protective apparatus . . . . . „ 1905
TORCHIO, P. — Notes on lightning arrester on Italian high-tension transmission lines . . . . . „ 1905
NEALL, N. J. — Performance of lightning arresters on transmission lines . . . . . „ 1905
OSGOOD, F. — Some experience with lightning and static strains on a 33 K. V. system . . . . . „ 1906
CREIGHTON, E. E. F. — Methods of testing protective apparatus . . . . . „ 1906
WIRT, H. C. — Protective apparatus for lightning and static strains . . . . . „ 1906
STEINMETZ, C. P. — Theoretical investigation of circuits containing distributed inductance, series capacity, and shunt capacity, applied to the multigap arrester . „ 1906
JACKSON, R. P. — Recent investigations of lightning protective apparatus . . . . . „ 1906
BERG, E. J. — Line Constants and abnormal voltages and currents in high-potential transmissions . . . „ 1907
STEINMETZ, C. P. — Lightning Phenomena in Electric Circuits „ 1907
RUSHMORE, D. B. & DUBOIS, D. — Protection against lightning, and the Multigap lightning arrester . . . „ 1907
CREIGHTON, E. E. F. — New Principles in the design of lightning arresters . . . . . „ 1907
JACKSON, R. P. — Potential Stresses as affected by Overhead Grounded Conductors . . . . . „ 1907
CREIGHTON, E. E. F. — Protective Apparatus Engineering „ 1907
THOMAS, P. H. — Practical Testing of Commercial lightning arresters . . . . . „ 1907
NEALL, N. J. — A Proposed Lightning Arrester Test . „ 1907
KINTNER, S. M. — Choke-Coils versus Extra Insulation on the End-Windings of Transformers . . . . „ 1907
ROWE, N. — Lightning-Rods and Grounded Cables as a Means of Protecting Transmission Lines against Lightning . . . . . „ 1907

Digitized by Google

NICHOLSON, L. C. — Location of Broken Insulators and other Transmission Line Troubles . . . . . A. I. E. E. 1907
VAUGHAN, J. F. — Comparative Tests of Lightning Protection Devices on the Taylor's Falls Transmission System . . . . . „ 1908
NEALL, N. J, — Studies in Lightning Performances, Season 1907 . . . . . „ 1908
CREIGHTON, E. E. F. — Measurement of Lightning, Aluminum Lightning Arresters, Earth Resistances, Cement Resistances, and kindred tests . . . . . „ 1908
THOMAS, P. H. — Critical Study of Lightning Records on Tailor's Falls, Transmission Line . . . . . „ 1908
STEINMETZ, C. P. — The General Equations of the Electric Circuit . . . . . „ 1908
CREIGHTON, E. E. F. & SPRONG, S. D. — Surges on a Cable System with an Aluminum Surge Protector . . „ 1909
LINCOLN, P. M. — Protection of Electrical Equipment . „ 1909
NICHOLSON, L. C. — Practical Method of Protecting Insulators . . . . . „ 1910
THOMAS, P. H. — Lightning Protection . . . . . „ 1910
CREIGHTON, E. E. F. — Protection of Electrical Transmission Lines . . . . . „ 1911
BURKHOLDER, C. I. & MARVIN, R. H. — Tests of Grounded Phase Protector on the 44.000 volt System of the Southern Power Company . . . . . „ 1911

Some References Relating to Electrical Transmission & Switching.

SCOTT, C. F. — High Voltage Power Transmissions (Corona Losses) . . . . . A. I. E. E. 1898
HUTCHINSON, C. T. — The Protection of Secondary Circuits from Fire Risks . . . . . „ 1899
PERRINE, F. A. C. — Elements of Design pertaining to Long Distance Transmission . . . . . „ 1901
RICE, Jr. E. W. — Control of High-Potential Systems . „ 1901
STOTT, H. G. — Locating Faults in (Cables) . . . „ 1901
BUCK, H. W. — Buffalo... Cable Distributing Systems . „ 1901
PERRINE, F. A. C. & BAUM, F. G. — Use of Aluminum Wire and some constants for Transmission Lines . „ 1901
STOTT, H. G. — Distribution and Conversion of received currents . . . . . „ 1901
LINCOLN, P. M. — Transposition and Relative Location of Power and Telephone Lines . . . . . „ 1903

Digitized by Google

CHESNEY, C. C. — Burning of Wooden Pins on High-Tension Transmission lines	A. I. E. E.	1903
JUNKERSFELD, P. — Multiple vs. Indipendant Operation of Units and Central Stations	»	1903
WILSON, LEONARD. — Reverse Current Circuit Breakers .	»	1903
SKINNER, C. E. — Methods of Bringing High-Tension Conductors into Buildings	»	1903
BLACKWELL, F. O. — Y or Delta Connections of Transformers	»	1903
STOTT H. G. — The Use of Automatic Means of Disconnecting Disabled Apparatus	»	1903
TORCHIO, P. — The Operation and Maintenance of High-Tension Underground Systems	»	1903
ELGIN, W. C. L. — Safe Guards and Regulations in Operation of Overhead Distributing Systems . . .	»	1903
RYAN, H. J. — Conductivity of the Atmosphere at high voltages	»	1904
STILLWELL, L. B. — Use of Group Switches in large Power Plants	»	1904
HEWLETT, H. E. — Oil Switches for High Pressure . .	»	1904
CARLTON, W. G. — Protection of Cables from Arcs due to Failure of Adjacent Cables	»	1904
BLACKWELL, F. O. — Long Spans for Transmission lines .	»	1904
GERRY, M. H. — Conditions for Continuous Service over lines operated in parallel	»	1904
PECK, J. S. — Use of Ground Shields in Transformers .	»	1904
BUCK, H. W. — Duplication of Electrical Apparatus to secure reliability of service	»	1905
OSGOOD, F. — Notes on Hydroelectric Plant Organization and Operation	»	1907
SCHOLES, D. R. — Transmission Line Tower and Economical Spans	»	1907
HEWLETT, E. M. — A New Type of Insulator for High Tension Transmission Lines	»	1907
BUCK, H. W. — Some New Methods in High Tension Line Construction	»	1907
MERSHON, R. D. — The Transmission Plant of the Niagara, Lockport & Ontario Power Co.	»	1907
LINCOLN, P. M. — The Grounded Neutral, With and Without Series Resistance in High-Tension Systems . .	»	1907
RHODES, G. I. — Experience with a Grounded Neutral on the High-Tension System of the Interborough Rapid Transit Co.	»	1907
MURRAY, W. S. — The New Haven System of Single Phase Distribution with special reference to Sectionalization.	»	1908

Digitized by Google

SCHOLES, D. R. — Fundamental Considerations Governing the Design of Transmission Line Structures . . A. I. E. E. 1908
SCHWEITZER, E. O. — High-Potential Underground Transmission . . . . . „ 1908
RANDALL, K. C. — High-Voltage Transformers and Protective and Controlling Apparatus for Outdoor Installation „ 1909
TAYLOR, J. B. — Even Harmonics in Alternating Current Circuits . . . . . „ 1909
DOWNING, P. M. — The Developed High-Tension Net-Work of a General Power System . . . . . „ 1910
FRANK, J. J. — Observation of Harmonics in Current and in Voltage Waves Shapes of Transformers . . . „ 1910
BABCOCK, A. H. — Transmission Line Crossings of Railroad Rights-of-Way . . . . . „ 1910
CHEYNEY, A. R. — The Generating System of an Electric Lighting Company . . . . . „ 1910
CHEYNEY, A. R. — The Modern Oil Switch with Special Reference to Systems of moderate Voltage and Large Ampere Capacity . . . . . „ 1910
WEST, E. L. — High Voltage Line Loss Tests made on the 110-Kilovolt, 60-cycle, 180-Mile Transmission Line of the Central Colorado Power Co. . . . . „ 1911
CUNNINGHAM, J. H. — Design, Constructions, and Tests, of an Artificial Transmission Line . . . . . „ 1911
FACCIOLI, G. — Tests of Losses on High-Tension Lines . „ 1911
MERRIAM, E. B. — Oil-Break Circuit Breakers . . . „ 1911
ROBERTSON, W. L. — Solution to Problems in Sags & Spans „ 1911
THOMAS, P. H. — Sag Calculations for Suspended Wires „ 1911

Some References Relating to Insulation.

FESSENDEN, R. A. — Insulation and Conductors . . A. I. E. E. 1898
STEINMETZ, C. P. — Dielectric Strength of Air . . „ 1898
SHEPARDSON, G. D. — Some Telephone Disturbances from Electrical Generators . . . . . „ 1898
SKINNER, C. E. — Energy Loss in Commercial Insulating Materials . . . . . „ 1902
BLACKWELL, F. O. — The Testing of Insulators . . „ 1903
THOMAS, P. H. — Testing... Apparatus for Dielectric Strength „ 1903
FISHER, H. W. — Data relating to Electric Conductors and Cables . . . . . „ 1905
CLARK, W. S. — Comments on Present Underground Cable Practice . . . . . „ 1906
FISHER, H. W. — Power-Factor, Alternating Current, In-

Digitized by Google

ductive Capacity, Chemical, and other tests of Rubber-Covered Wires of different manufacturers . . . A. I. E. E. 1907
SKINNER, C. E. — The Testing of High-Voltage Line Insulators . . . . . „ 1908
REYNDERS, A. B. — Condenser Type of Insulation for High-Tension Terminals . . . . . „ 1909
MOODY, W. S. & FACCIOLI, G. — Corona Phenomena in Air and Oil and their Relation to Transformer Design . „ 1909
HAYDEN, J. L. R. & STEINMETZ, C. P. — Disruptive Strength with transient Voltages . . . . . „ 1910
KEMPTON, W. H. — The Application of Porcelain to Strain Insulators . . . . . „ 1910
WHITEHEAD J. B. — The Electric Strength of Air . . „ 1910
TOBEY, H. W. — Dielectric Strength of Oil . . . „ 1910
OSBORNE, H. S. & PENDER, H. — Potential Stresses in Dielectrics . . . . . „ 1910
RYAN, H. J. — Open Atmosphere and Dry Transformer Oil as High-Voltage Insulators . . . . . „ 1911
HENDRICKS JR., A. B. — High-Tension Testing of Insulating Materials . . . . . „ 1911
WHITEHEAD, J. B. — The Electric Strength of Air II . „ 1911
AUSTIN, A. O. — The High-Efficiency Suspension Insulator „ 1911

References Relating to Fused Protectors.

SACHS, J. — Evolution of Safe and Accurate Fuse Protective Devices . . . . . A. I. E. E. 1900
LACOURT, H. O. — Standardization of Enclosed Fuses . „ 1905
DOWNES, L. W. — Some Considerations in Designing Heavy Capacity Fuses . . . . . „ 1909

In the transactions of National Electric Light Association there is a wealth of material concerning line construction. There are the reports of several committees which have to do specifically with protective apparatus, such for example as: The Committee on Protection from Lightning, Committee on Grounding of Secondary, Committee on Grounding of Alternating Current Circuits, and Committee on Overhead Line Construction.

During the past few years there have been a number of papers of relative interest, especially from the operating stand-

Digitized by Google

point; such for example as: The use of Reactance Coils in Generating Stations by P. Junkerfeld, Practical design of Reactance Coils for Turbo-Generators by A. S. Loizeaux, Requirements and Specifications for Extra High Potential Transmission Lines by A. S. Ives. The paper of greatest importance on the subject of Lightning was presented by Dr. C. P. Steinmetz in " Transactions of the Thirtieth Convention, 1907 „, Vol. I.

There have been various lectures at different institutions and articles written in the current Electrical Periodicals bearing on this subject, but so far as concerns lightning arresters and protection from abnormal potential is concerned the suject matter is well covered by the foregoing references to the Transactions of the American Institute, The National Electric Light Association, Dr. Steinmetz, Lecture Course and Transient Phenomena.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

On veut ici décrire succinctement les progrès réalisés par l'Électrotechnie dans la protection des installations contre les perturbations électriques, sans entrer dans une analyse détaillée de la classification de ces perturbations, ni dans les détails de construction des appareils de protection que l'on entend faire connaître.

Les principaux facteurs des problèmes que soulève la protection contre les perturbations électriques sont les suivants:

A. — *Nature et origine des perturbations électriques;*
B. — *Caractéristiques des isolants;*
C. — *Caractéristiques des dispositifs de protection;*
D. — *Application pratique et commerciale.*

A) — Nature et origine des perturbations électriques.

Ces perturbations se peuvent pratiquement partager en:

a) *Perturbations de la tension (surtension).*

b) *Perturbations dynamiques du courant (résultant de courts-circuits).*

De prime abord, cette subdivision semble inopportune, puisque, autant l'une que l'autre ces perturbations comportent des mouvements de l'électricité, c'est-à-dire des courants; elle se justifie pourtant, dans la pratique, par la plus grande somme d'énergie que les secondes mettent généralement en jeu et par des effets spéciaux que les premières ne produisent pas (échauffements considérables, etc.).

Les perturbations de la tension se subdivisent, en outre, en:

a_1) *Décharges atmosphériques (foudre);*
a_2) *Décharges accidentelles à la terre;*
a_3) *Résonnances;*
a_4) *Contacts métalliques de circuits à des potentiels différents;*
a_5) *Induction continue.*

Digitized by Google

Sous le titre a_1) *Décharges atmosphériques, on rappelle les calculs du* Dr. C. P. Steinmetz, *qui fixent entre 500.000 et 1.000.000 la fréquence possible dans ces décharges, et en moyenne à 10.000 amp. l'intensité de leur courant.*

Les décharges accidentelles à la terre peuvent se produire, soit dans un isolateur, soit dans une connexion entre deux câbles, soit à l'entrée des câbles dans les transformateurs, soit enfin dans une des bobines du générateur. La surtension qu'elles provoquent devient dangereuse toutes les fois, qu'entre la charge électrostatique et la fréquence s'établit un rapport de résonnance.

La résonnance est généralement due à un arc quelconque qui se forme spontanément dans le circuit. L'étude de ses effets ne peut se faire qu'expérimentalement.

L'induction continue a pour source les ondes de Hertz des transmissions sans fil.

Les perturbations dynamiques (courts-circuits) peuvent produire les effets suivants:

1 — *Interrompre le service;*

2 — *Causer des efforts mécaniques anormaux, qui s'exercent à la fois sur l'arbre et sur les enroulements des machines;*

3 — *Échauffement excessif des isolants;*

4 — *Pulsations électromagnétiques de potentiel causées par des interruptions instantanées (explosions d'arcs) qui provoquent des surtensions très élevées;*

5 — *Surtensions anormales dans le générateur, causées par des courts-circuits qui n'intéressent qu'une partie des phases.*

B) — Caractéristiques des isolants.

L'étude des divers matériaux isolants n'est pas moins importante que celle de la qualité de la tension à laquelle ils sont destinés. En ce qui concerne la protection, il y a deux éléments principaux à considérer dans le choix des isolants: le retard dans la production de l'étincelle (intervalle entre le moment de l'application du potentiel et celui de la décharge), et la propriété d'autorétablissement.

Il convient donc de considérer les classes suivantes d'isolants:

b_1) *l'air;*

b_2) *les huiles;*

b_3) *la porcelaine;*

b_4) *les autres solides.*

On donne ici une brève analyse des propriétés de chacune de ces classes d'isolants.

Digitized by Google

C) — Caractéristiques des dispositifs de protection.

Pour apprécier la valeur d'un parafoudre *les éléments principaux à prendre en considération sont les suivants:*

Tension de l'étincelle;

Intensité (courant) de la décharge à une tension double de la normale;

Résistance à la décharge continue;

Retard de l'étincelle dans le diélectrique.

On décrit quelques appareils de protection:

Parafoudre à intervalles multiples.

C'est le type connu des parafoudres à cylindres avec résistances shuntant des groupes différents de cylindres.

La théorie de la tension de l'étincelle dans ce parafoudre a été exposée par Steinmetz en 1906. Lorsqu'une décharge atmosphérique frappe un parafoudre de ce genre, l'étincelle ne jaillit pas simultanément entre tous les cylindres, mais successivement, du premier au dernier, et avec des fréquences de billions de périodes par seconde.

Ce parafoudre est très sensible aux perturbations douées de haute fréquence; il l'est moins, toutes proportions gardées, aux perturbations à basse fréquence; il s'ensuit qu'il n'a pas une tension fixe d'étincelle.

La méthode ordinairement employée pour déterminer l'effet d'un parafoudre à décharges transitoires est basée sur la mesure de la longueur d'un needle spark gap *monté en parallèle.*

Une décharge atmosphérique sur un parafoudre est invariablement suivie d'un afflux de courant dynamique du réseau; il est donc indispensable que ce parafoudre soit doué de la faculté d'éteindre les arcs que forme ce courant avant qu'ils n'aient eu le temps de consumer l'appareil.

Le retard de l'étincelle est en raison inverse de la différence de potentiel appliquée; il en résulte que dans un parafoudre trois facteurs: la différence de potentiel, la fréquence de la perturbation et le retard de l'étincelle, arrivent à se compenser mutuellement.

Le parafoudre à intervalles multiples présente, grâce à ses résistances montées en parallèle, des voies nombreuses à la décharge, qui choisit l'une ou l'autre suivant son intensité et sa fréquence.

Parafoudre à aluminium.

Le principe essentiel de ce parafoudre repose sur l'emploi de cônes en aluminium emboîtés les uns dans les autres en une série où, entre chaque cône, est interposé un électrolyte qui forme une pellicule sur ces cônes quand il est traversé par un courant électrique.

Digitized by Google

La caractéristique de cette pellicule est d'offrir une résistance très élevée aux tensions inférieures à 300 V. et une résistance nulle aux tensions supérieures à cette limite; la décharge n'est donc limitée que par la basse résistance de l'électrolyte.

Lorsque des potentiels étrangers à celui du réseau atteignent une valeur double de la normale, la décharge à la terre s'effectue à travers le parafoudre à une intensité qui peut varier de 500 à 1000 ampères, suivant les dimensions des éléments en aluminium.

Un parafoudre à cornes est disposé en série avec les éléments. Le retard de l'étincelle dans cet organe est réduit au minimum.

Parafoudre à vide.

Il est fondé sur un principe connu depuis longtemps, et ne sert que pour la basse tension.

Suivent quelques détails sur les bobines de réactance appliquées aux parafoudres.

Appareil d'extinction de l'arc à terre.

Se compose d'un relai indicateur et d'un coupe-circuit unipolaire pour chacune des phases. Le coupe-circuit met automatiquement à la terre la phase frappée et dénoncée par le relais.

Dans les lignes aériennes le coupe-circuit se rouvre automatiquement aussitôt l'arc éteint. Pour les réseaux souterrains, au contraire, le coupe-circuit reste clos après la décharge.

Mise à la terre du secondaire dans les circuits à basse tension. C'est une pratique très en faveur sur les réseaux de distribution pour l'éclairage.

Conducteur aérien mis à la terre.

Un conducteur suspendu au-dessus de la ligne, et mis à la terre à chaque support, la protège dans une certaine mesure contre les décharges atmosphériques. Ce système a été adopté dans beaucoup d'installations.

Mise à la terre du neutre.

Système peu favorable, dans tous les cas, à la continuité du service quand on a fréquemment des courts-circuits à terre sur la ligne. Mettre le neutre à terre signifie transformer les perturbations de tension en perturbations de courant.

Digitized by Google

Protection des lignes obtenue au moyen d'isolements très élevés et de l'effet couronne.

Sur les lignes à très haute tension (100.000 volts et plus) les perturbations électriques sont moins énergiques que sur celles à une tension relativement plus faible.

*Peut-être le doit-on à l'isolement très élevé qu'exige un transport à ces tensions, ou encore, à ce que la tension normale s'approche de celle de l'*effet couronne *qui décharge naturellement les surtensions.*

Parafoudre à cornes avec résistances en série.

Système abandonné aux États-Unis pour les lignes de transport; on ne l'applique plus guère que sur des circuits de lampes à arc.

Appareils sous tension.

Coupe-circuits automatiques qui doivent répondre à deux réquisitions: ouvrir ou fermer un circuit; fonctionner comme valve de sûreté.

Coupe-circuits de sûreté.

Il en est de trois types: à fil fusible nu, à fil fusible couvert, à fil fusible explosif; chacun d'eux a son application spéciale: les deux premiers sont employés sur la basse tension et le troisième sur la haute tension.

Bobines de réactance pour garantir contre les courants de court-circuit.

Elles servent à limiter le courant, en cas de court-circuit accidentel.

Adaptabilité pratique et commerciale.

La pratique demande 4 genres de protection:

1° *Celle qui a pour objet la continuité du service;*

2° *La protection des appareils électriques;*

3° *La protection de la vie humaine contre les dangers que présente l'électricité;*

4° *La protection contre les incendies.*

Théoriquement parlant, il est possible de satisfaire à toutes ces conditions, et de construire des appareils offrant toutes les garanties de protection que l'on puisse imaginer; mais un obstacle s'élève toujours pour contrarier la théorie; c'est l'obstacle du coût trop élevé. Les éléments à

Digitized by Google

considérer pour déterminer le choix des appareils de protection sont donc les suivants:

1° *Valeur totale des appareils à protéger;*

2° *Valeur des appareils de réserve;*

3° *Frais de reconstruction des appareils endommagés;*

4° *Frais de démontage et de remontage;*

5° *Intérêt sur la valeur des appareils de réserve;*

6° *Dommages partiels aux organes d'isolement;*

7° *Perte de recettes pendant la durée de l'interruption du service;*

8° *Perte de prestige et diminution de la bienveillance du public, comme résultat de l'interruption du service;*

9° *Perte d'affaires nouvelles causée par la défaveur résultant de l'interruption du service.*

Chacun de ces points doit être considéré séparément: si le parafoudre ne doit servir qu'à protéger l'installation, sa valeur ne devra être que celle d'une partie des appareils qu'il est destiné à garantir; si au contraire les accidents contre lesquels on veut se prémunir sont de nature à vous exposer à payer des amendes pour interruption de service, des dommages pour incendies provoqués ou pour lésions aux personnes, l'exagération apparente des frais de protection est parfaitement justifiée.

L'auteur poursuit, entrant dans des détails sur les types d'appareils de protection qui répondent le mieux aux cas suivants:

1° *Protection des transformateurs de 30.000 volts et au delà;*

2° *Protection des transformateurs de moins de 30.000 volts destinés aux seuls circuits de transmission;*

3° *Protection des transformateurs pour circuits de distribution à 2300 volts et au delà;*

4° *Protection des centrales (générateurs et transformateurs);*

5° *Protection de circuits de 110 à 250 volts;*

6° *Protection des chemins de fer à courant continu;*

7° *Protection de circuits à basse tension, tels que circuits de signaux automatiques pour chemins de fer à vapeur, téléphones, télégraphes;*

8° *Protection des lignes de transmission.*

Digitized by Google

HIGH TENSION SWITCHING PHENOMENA

Rapporto sul Tema N. 6 del Congresso.

Relatore G. FACCIOLI (Pittsfield Mass. U. S. A.).

In the summer of 1910, some experiments were performed on the lines of the Central Colorado Power Company for the purpose of studying line oscillations produced by the operation of high tension oil switches. These lines are especially interesting to engineers, because they traverse the Rocky Mountains under unusually severe climatic and atmospheric conditions.

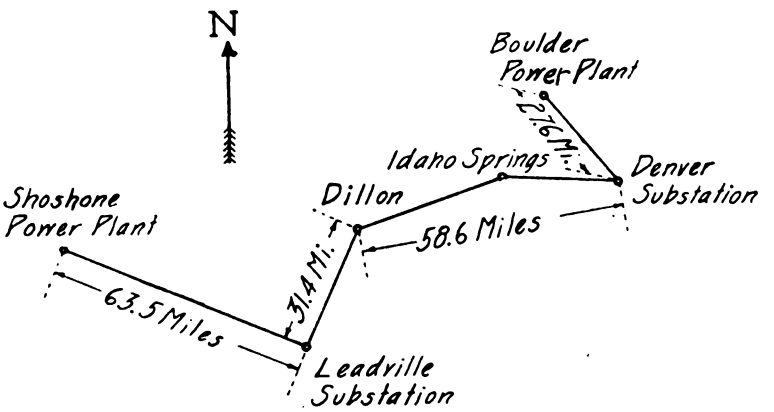


Fig. 1.

Fig. 1 is a map of the system of the Central Colorado Power Company.

At the time of the tests, the energy was furnished from the power house at Shoshone by two 5.000 kv-a. 3-phase generators. These alternators were Y-connected with grounded neutral. Their normal voltage was 4.000 volts between phase conductors and their speed 400 r. p. m.

Digitized by Google

The line was operated at a voltage of 95.000 volts and at a frequency of 60 cycles.

Fig. 2 gives the diagram of connections at the power house, where three single-phase 3.333 kv-a. transformers step up the voltage from 4.000 to 95.000 volts. The transformers are delta-connected on both primary and secondary sides and have a ratio of transformation of 23.8 to 1.

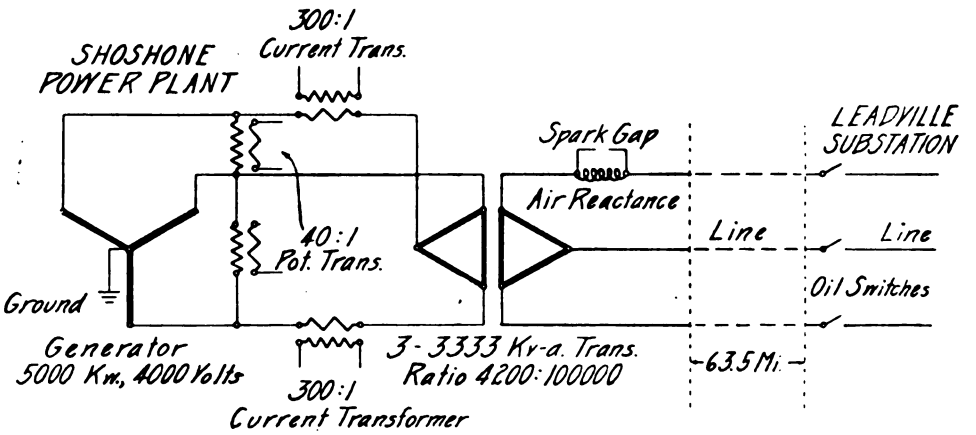


Fig. 2.

There are no high-tension oil switches at the power house between the high-tension winding of the transformers and the line. In fact, the operation of the system is so arranged that the line is never disconnected from or connected to the transformers when excited.

The three conductors of the three-phase line are situated on a horizontal plane with a distance of 124 inches between centers of adjacent conductors. Each conductor between Shoshone and Denver consists of a hemp center, six strand copper cable No. 0 B. & S. gauge, with the exception of a section between Leadville and Dillon where the conductors are of smaller size. From Denver to Boulder three, six strand copper cables, No 1 B. & S. gauge are used.

The length of the transmission line from Shoshone to Denver is 153.5 miles (247 kilometers), of which 63.5 miles (102 kilometers) are from Shoshone to Leadville, 31.4 miles (50 kilometers) from Leadville to Dillon, and 58.6 miles (95 kilometers)

Digitized by Google

from Dillon to Denver. The distance between Boulder and Denver is 27.6 miles (44 kilometers).

The line crosses the Continental Divide at three points, one between Shoshone and Leadville, at an altitude of 12.000 feet (3.660 meters), another between Leadville and Dillon, at 12.500 feet (3.810 meters), and a third between Dillon and Denver (Argentine Pass) at 13.700 feet (4.180 meters).

Fig. 3 represents the towers of the system. The insulators are all of the suspension type and have four porcelain insulating discs each.

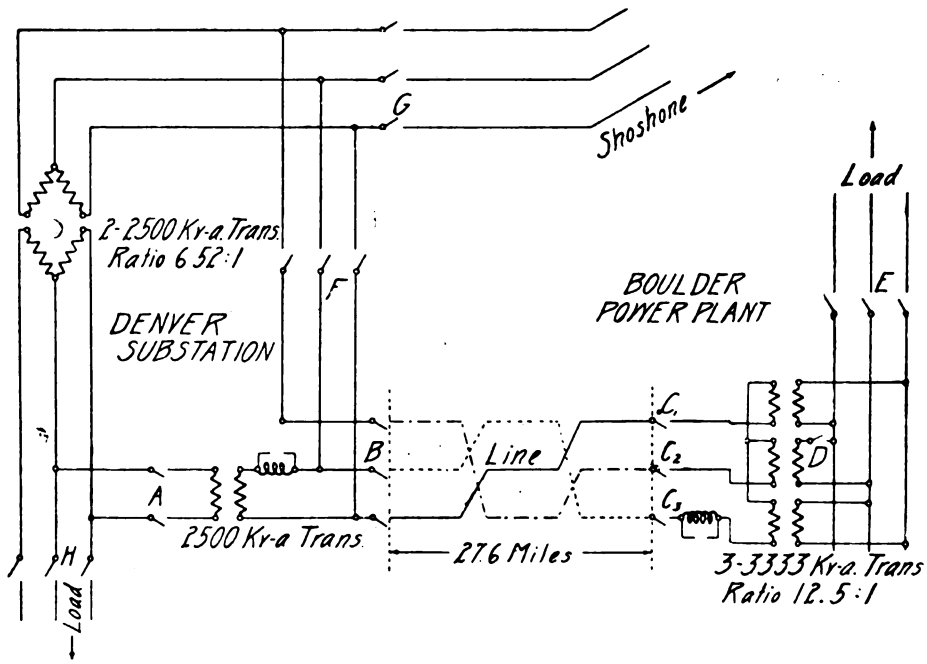


Fig. 4.

Fig. 4 gives the diagram of connections at the Denver substation, as they were at the time of the experiments.

The switches shown in the diagram as B and G are identical and are high-tension oil switches.

The switches shown as A and H are identical and are low-tension oil switches.

F is a three-phase air disconnecting switch, which was never operated when under tension.

At the present time, the lines are energized both from Sho-

Digitized by Google

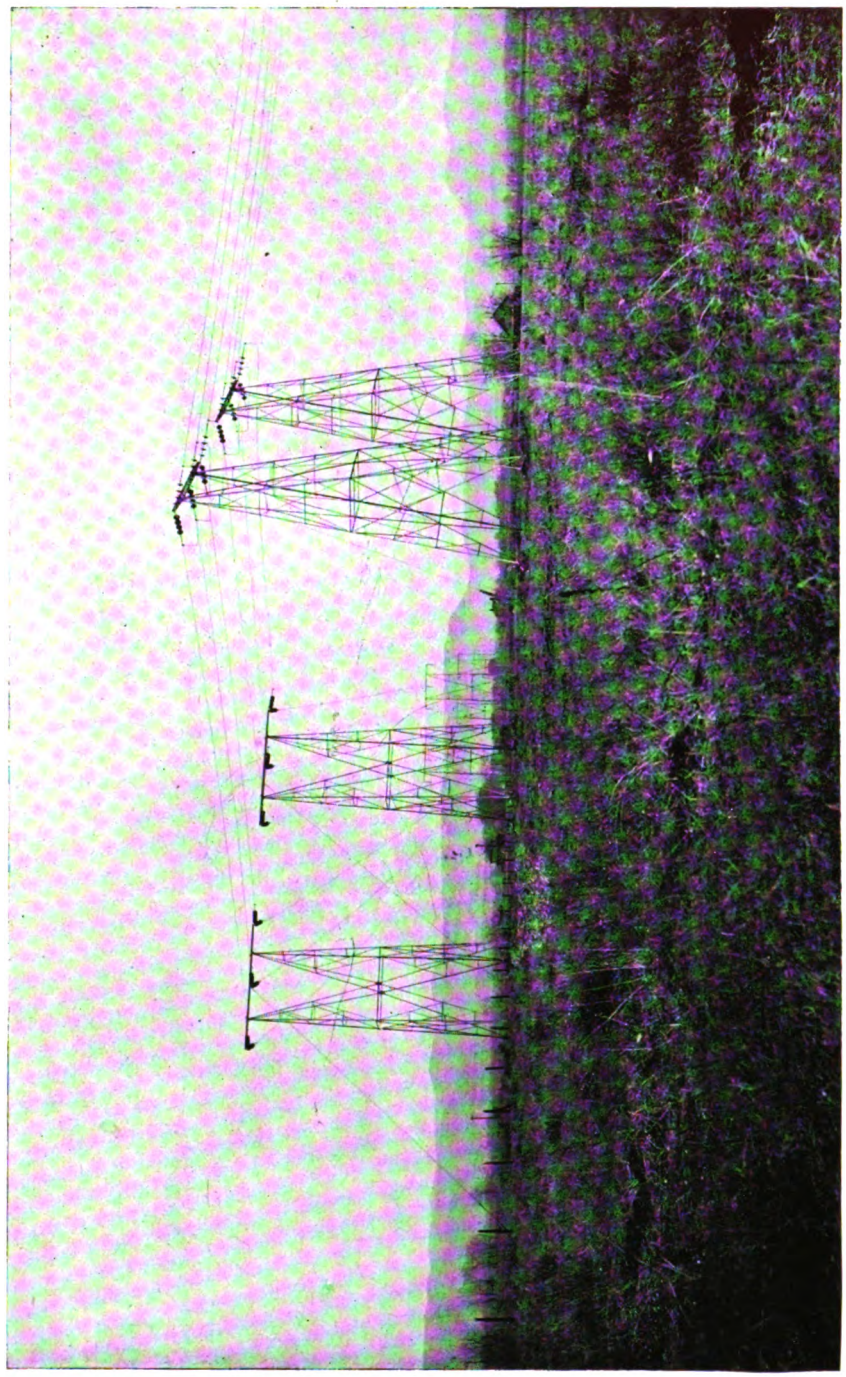


Fig. 3.

FACCIOLI.

Digitized by Google

Digitized by Google

shone and from Boulder; but at the time of the test the Boulder power house was not in operation.

The Shoshone-Denver line was connected at Denver through oil switches (G) to two 2.500 kv-a. transformers connected in open delta.

These transformers had a ratio of transformation of 6.52 to 1 and their normal voltage on the low tension side was 13.200 volts.

The Denver-Boulder section could be connected by high-tension oil switches (B) to high-tension bus bars energized by the Shoshone-Denver section, as shown in Fig. 4. However, in many of the experiments the Denver-Boulder line was used as single-phase (leaving one of the conductors idle) and was energized by the high-tension side of a 2.500 kv-a. transformer (ratio 1 to 6.52), whose low-tension side was connected to the low-tension bus bars of the Denver sub-station, energized from Shoshone.

Fig. 4 also shows the diagram of connections at the Boulder sub-station, where the high tension line is connected through air-switches (C) (which are never operated when the line is energized) to the high tension side of three single-phase 3.333 kv-a. transformers (ratio $12\frac{1}{2}$ to 1) delta-connected on the low-tension side, and Y-connected on the high-tension side. The neutral of the Y was not grounded.

The majority of the tests cover the switching of an unloaded section of the line on and off the end of another section of the line.

TEST *A*.

Switching by high tension switches the Denver-Boulder section, three-phase, on and off the Shoshone-Denver section.

1. Referring to Fig. 4, the section of the line from Shoshone to Denver (153.5 miles) is carrying normal load, the majority of which is connected to the low tension bus bars of the Denver sub-station.

The test consists in connecting and disconnecting the Denver-Boulder line (27.6 miles) 3-phase-open at Boulder-to and from the high tension bus bars at Denver energized from Shoshone.

Digitized by Google

In Fig. 4, the switches G and H are closed and, as said before, normal load is connected to the line.

The switch A is open.

The air switch F is closed.

The oscillations are taken at the instant of closing or opening the switch B. The switches C are open.

Record 1 gives the electromotive force across the low tension side of the unloaded 2.500 kv-a. transformer connected across two lines of the Denver-Boulder line at the Denver substation at the instant the switch B was opened, and therefore the three phase Denver-Boulder line was disconnected from the rest of the system.

The oscillogram was taken across the low tension side of a voltage transformer whose high tension side was connected across the low tension side of the 2.500 kv-a. step-down transformer. The record starts with a voltage corresponding to 89.5 kv. across line conductors and, after the oscillation is completed, the voltage is reduced to 88 kv. across line conductors, the difference being evidently due to the disappearance of the charging current of the Denver-Boulder section. The total oscillation lasts 11 cycles and the maximum voltage obtained is 14 % greater than the maximum value of the voltage before the line is switched off.

2. This test is very similar to test A 1, the only difference being that in test A 1 the Shoshone-Denver line was carrying normal load while in test A 2 the whole line is entirely unloaded.

Referring to Fig. 4, the switch G is closed, but the switch H is open. The air switch F is closed and the switch B is operated. The switches C are open.

Record 2 gives low tension e. m. f's when the Denver-Boulder line 3-phase - open at Boulder - is switched on to the high tension bus bars energized by the unloaded Shoshone-Denver line. The two e. m. f's are obtained through voltage transformers on the low tension side of the two 2.500 kv-a. transformers connected in open delta. One of the voltages is across the winding of one of the transformers and the other voltage is across the open delta. When the Denver-Boulder section is connected, the voltage given by the record corresponds to 84 kv. between line conductors, while the voltage at the power house at Shoshone is 70.5 kv. between line conductors.

Digitized by Google

Record 3 is taken under conditions identical with those of record 2, but it gives the oscillation at the moment the Denver-Boulder section is disconnected by opening the switch B. The voltage is the same as in the case of Record 2.

The oscillation lasts 13 cycles, and the maximum voltage is 17 % greater than the maximum value of the voltage with the Denver-Boulder section connected.

Record 4 covers the same phenomena as record 3 and gives the oscillation at the moment of switching off the Denver-Boulder section. However, while in the case of record 3 the voltage at Denver was 84 kv., in the case of record 4 the voltage at Denver is 100 kv., while the voltage at the Shoshone power house is 90 kv. between high tension conductors.

The oscillation lasts 10 cycles, and the maximum voltage is 20 % greater than the maximum value of the voltage with the Denver-Boulder section connected.

3. Test A3 is the same as Test A1, but the Denver-Boulder section of the line is not open at Boulder but connected to three 3.333 kv-a. transformers as shown in Fig. 4. The switches G, H and F are closed. Switch A is open. Switches C are closed. Switch B is operated. Switch E is open and therefore the step-down transformers at Boulder station are unloaded.

Record No. 5 gives the oscillation at the moment of closing and opening the switch B thereby connecting and disconnecting the Denver-Boulder section 3-phase from the rest of the system. The e. m. f. shown by the record is taken on the low tension side of the 2.500 kv-a. transformer connected across two conductors of the Denver-Boulder line as described in Test A1.

When the Denver-Boulder section is connected, the e. m. f. given by the record corresponds to 89 kv. between phase conductors at Denver, the voltage at Boulder being 88.5 kv. between phase conductors.

The oscillation on closing the switch B lasts one-half cycle, while the oscillation on opening the switch B lasts 9 cycles.

The maximum voltage obtained in switching on is 6 % higher than the maximum value of the normal e. m. f. with the Denver-Boulder section connected. The maximum voltage obtained in switching off is 12 % above the maximum value of the normal e. m. f. with the Denver-Boulder section connected.

4. Test A4 is similar to the preceding tests with the

Digitized by Google

difference that the Denver-Boulder 3-phase line was loaded at Boulder with a water rheostat. The load was 1200 kw.

Referring to diagram 4:

Switches G and H closed,
F closed,
A open,
B operated,
C closed,
D closed,
E closed.

Record 6 gives the oscillation at the moment of opening the switch B. The voltage is taken on the low tension side of the 2.500 kv-a. transformer connected across two conductors of the Denver-Boulder section as described in Test A 1. The voltage when the Denver-Boulder line is connected corresponds to 89.5 kv. between phase conductors at Denver, the voltage at Boulder being 88 kv. between phase conductors.

The oscillation lasts 7.5 cycles. The maximum voltage is 12 % higher than the maximum normal value of the e. m. f. with the Denver-Boulder section connected.

B.

Switching, by high-tension switches, the Denver-Boulder section, single-phase, on and off the high-tension winding of the 2500 kv-a. step-up transformer energized by the low-tension bus bars at Denver.

1. The Denver-Boulder single-phase line is open at Boulder.

Referring to diagram 4:

Switches G and H closed,
F open,
A closed,
B operated,
C open.

Record 7 gives the oscillation at the moment of closing the switch B.

The e. m. f. is taken on the low tension side of the 2.500 kv-a. step-up transformer, which is excited by two of the low-tension bus bars of the Denver sub-station.

Digitized by Google

The record gives also the current flowing in the low-tension winding of the same transformer. The oscillation lasts 2 cycles. The maximum voltage is 3 % above the normal maximum value of the e. m. f. with the Denver-Boulder section connected. The current reaches a maximum value 420 % higher than the maximum value of the current with the Denver-Boulder line connected.

The record starts obviously with the exciting current of the 2.500 kv-a. transformer and, after the oscillation is completed, the current is the resultant of the exciting current of the transformer and of the charging current of the Denver-Boulder section.

The exciting current of the transformer and the resultant of this exciting current and of the charging current of the Denver-Boulder line, are given respectively in records No. 8 and No. 9.

The current of record 8 has the typical shape of an exciting current of a transformer and contains a large triple frequency component.

The current given in record 9 has the following components:

Maximum	value	of	complex	wave	.	.	.	100 %
„	„	„	fundamental		.	.	.	68.9 %
„	„	„	3rd.	harmonic	.	.	.	29.9 %
„	„	„	5th.	„	.	.	.	16.6 %
„	„	„	7th.	„	.	.	.	35.6 %
„	„	„	9th.	„	.	.	.	2.5 %
„	„	„	11th.	„	.	.	.	7.1 %

The third harmonic is introduced by the magnetization of the transformer.

The e. m. f. of record No. 7 when the Denver-Boulder line is connected corresponds to 86 kilovolts between high tension conductors. The exciting current of the transformer in Record 7 and 8 is 11.44 amperes, and the resultant of the exciting current of the transformer and of the charging current of the line in Records 7 and 9 is 31.53 amperes.

Record No. 10 gives the oscillation of current and e. m. f. at the moment the switch B is opened, the values of current and e. m. f. being the same as in the preceding record. The oscillation lasts 9 cycles. The maximum voltage is 28 % higher

Digitized by Google

than the maximum normal e. m. f. when the line is connected. The current reaches a maximum value 417 % higher than the maximum value of the current when the line is connected.

Record No. 11 gives the oscillation at the moment of closing the switch B and at the moment of opening the switch B. Therefore, it represents the same oscillation as records Nos. 7 and 10. However, while records 7 and 10 were taken at 86 kv. between high tension conductors (the ratio of the 2.500 kv-a. step-up transformer being 1 to 6.52) record No. 11 is taken at 42.8 kv. between high tension conductors (the ratio of transformation of the 2.500 kv-a. transformer being 1 to 3.26). The record starts with the exciting current of the step-up transformer, which is 11.44 amperes, and after the first oscillation the current becomes the vectorial difference between the charging current of the line and the exciting current of the transformer, and has a value of 9.5 amperes. After the second oscillation the current is again the exciting current of the transformer.

The oscillation in closing the switch lasts 1.5 cycles. The maximum voltage is 10 % above the maximum value of the e. m. f. with line connected, and the maximum value reached by the current is uncertain but more than 500 % above the maximum value of the exciting current of the transformer.

The oscillation in opening the switch lasts 10 cycles. The maximum voltage is 13 % higher than the maximum value of the e. m. f. with line connected and the current reaches a maximum value about 500 % greater than the maximum value of the exciting current of the transformer.

2. Test B2 is identical with test B1 with the difference that the single-phase Denver-Boulder section is not open at the Boulder end but is closed upon two 3.333 kv-a. single-phase transformers connected in series across line conductors at Boulder.

Referring to Fig. 4:

Switches G and H closed,
F open,
A closed,
B operated,
C1 and C3 closed,
C2 open,
D open,
E open.

Digitized by Google

Record 12 gives the oscillation of e. m. f. and current at the moment of closing the switch B, the e. m. f. being taken, as before, across the low tension side of the 2.500 kv-a. step-up transformer and the current being the current flowing through the low-tension winding of this transformer.

The e. m. f. corresponds to 85.7 kv. between line conductors at Denver, the voltage at Boulder being 87 kilovolts. The exciting current of the transformer is 11 amperes and, after the oscillation, the resultant current is 25.8 amperes.

The oscillation lasts 2 cycles. The maximum voltage is 40 % above the maximum value of the e. m. f. with line connected and the current reaches a value of 870 % higher than the maximum value of the resultant of the exciting and charging current.

Record No. 13 is taken at the Boulder sub-station. All the connections are the same as in the case of Record 12 and Record 13 gives the e. m. f. across the low tension side of one of the step-down transformers at Boulder when the switch B is closed at Denver.

The voltage corresponds to 87 kv. between line conductors. The main oscillation lasts 2 cycles. The maximum voltage is 40 % above its maximum normal value.

Record No. 14. All the connections are the same as in Records 12 and 13, but the oscillation is recorded at the moment of opening the switch B. Record 14 gives the e. m. f. across the low tension side of the 2.500 kv-a. transformer at Denver and the current flowing through the low tension winding of this transformer, i. e. the same quantities as Record 12. The voltage with Denver-Boulder section connected is 85.7 kv. at Denver.

The record starts with a current which is the vectorial difference between the charging current of the Denver-Boulder section and the exciting current of the transformer (31.5 amperes), and after the oscillation is completed, the current is 11.44 amperes, the exciting current of the step-up transformer. The oscillation lasts 8 cycles. The maximum voltage is 10 % above the maximum value of the e. m. f. when the line is connected. The current reaches a maximum value 208 % higher than the maximum value of the resultant of charging and magnetizing currents.

Record No. 15 is taken under identical conditions as record 14. The oscillation, in opening the switch, lasts 8 cycles. The

Digitized by Google

maximum voltage is 26 % above the maximum value of the voltage with Denver-Boulder section connected. The maximum value reached by the current is about 300 % higher than the maximum value of the current with Denver-Boulder section connected.

Record 16 is taken at the Boulder station under conditions similar to those of record 13, but while record 13 gives the oscillation at the end of the single-phase line when the switch B is closed, record 16 gives the oscillation at the end of the same line when the switch B is opened.

The oscillation is not entirely recorded. The zero line of voltage, after the Denver-Boulder section is disconnected shows, first the exchange of energy between the capacity of the single-phase Denver-Boulder line and the inductance of the step-down transformers at Boulder, and then a very small e. m. f. of fundamental frequency, due to the mutual induction between the Denver-Boulder single-phase line and the main Shoshone-Denver line, the two lines running parallel for several miles near the Denver sub-station.

C.

Switching, by high tension switches, an unloaded transformer on and off the end of a line.

1. The Shoshone-Denver line is excited from Shoshone and entirely unloaded. Two 2.500 kv-a. transformers connected in open delta are switched on and off the end of the 153.5 miles of three phase line. Referring to diagram 4:

Switches G operated,
F open,
H open,
A open,
B open.

Record 17 gives the e. m. f. across the low-tension windings of one of the 2.500 kv-a. step-down transformers at Denver and the e. m. f. across the low-tension open delta. The record is taken at the moment of opening the switch G. The e. m. f. across high-tension conductors at Denver is 80 kv-a., while the e. m. f. across the high tension conductors at the power house

Digitized by Google

is 70 kv. The oscillation lasts 3 $^1/_2$ cycles. There is no over-tension.

Record 18 is taken under identical conditions as record 17 and gives the oscillation at the moment of closing the switch G and at the moment of opening the switch G. There is no over-tension.

Record 19 gives the oscillation at the moment of opening the switch G as before, but the voltage at the power house is 90 kv. and the voltage at Denver is 100 kv. between line conductors.

The oscillation lasts 4 cycles. There is no over-tension.

2. — *2.500 kv-a. step-down transformer switched in and out by high-tension switches at Denver at the end of the Denver-Boulder single-phase section excited from Boulder.*

The connections for this test are different from the connections previously used. In fact, the Denver-Boulder line was excited at Boulder from another Company's system. The 2.500 kv-a. transformer at Denver was unloaded and the Shoshone-Denver system was entirely independent of the line under test.

Record 20. The e. m. f. is taken across the low tension side of the step-up transformer which energized the Denver-Boulder line at Boulder, and the current is the current flowing through the same low tension winding. The record is taken at Boulder at the moment the 2.500 kv-a. step-down transformer was switched on at Denver 28 miles distant.

There is no over-tension and the oscillation is limited to a change in the wave shape of the current, which shows the prolonged disturbance due to the excitation of the step-down transformer.

The record is taken at 84.5 kv. at Boulder and 85.6 kv. at Denver.

Record 21 is taken under identical conditions as record 20, but it gives the oscillation at the moment of switching out the 2.500 kv-a. step-down transformer at Denver.

There is no over-tension, but only a sudden change in the shape of the wave of current.

Digitized by Google

D.

Switching a three-phase line at the end of another unloaded three-phase line.

Record No. 22 gives the electromotive force and current at the Shoshone power house when the Leadville-Denver section of the line is switched on to the Shoshone-Leadville section of the line.

The conditions of the tests are as follows:

The Shoshone-Leadville 3-phase line (63.5 miles) is energized from Shoshone at 62 kv. between line conductors at the power house.

The line is entirely unloaded. The Leadville-Denver 3-phase section (90 miles) is closed at the Denver end by two 2.500 kv-a. transformers connected in open delta, but otherwise is unloaded. The record is taken at the moment of closing the high tension switches at Leadville thereby connecting the Leadville-Denver section to the Shoshone-Leadville section.

The e. m. f. is taken at the power house (63.5 miles distant from the switching point) across the low-tension winding of one of the three step-up transformers energizing the line, and the current is the current flowing through the same winding.

The record starts with an e. m. f. corresponding to 62 kv. across line conductors and with a current which is the resultant of the exciting current of the 3.333 kv-a. transformers and of the charging current of the Shoshone-Leadville section (12.6 amperes, referred to the high tension side). After the oscillation is completed, the voltage rises to 94.5 kv-a. and the current, referred to the high tension side, to 44.2 amperes. During the switching the field of the generator was kept constant.

The oscillation of the e. m. f. lasts 5 cycles, but the distortion of the current due to the rush of exciting current in the Denver transformers lasts much longer. The maximum voltage is 11 % higher than the maximum value of the e. m. f. when the Leadville-Denver section is connected.

Digitized by Google

E.

Switching, by low-tension switches, the Denver-Boulder single-phase section and 2.500 kv-a. step-up transformer on the low-tension bus bars of the Denver sub-station.

Referring to diagram 4:

Switch G closed,
F open,
H closed,
A operated,
B closed,
C open.

Record No. 23 gives the e. m. f. across the low tension side of the 2.500 kv-a. step-up transformer and the current flowing through its low tension winding when the switch A is closed and when the switch A is open. The e. m. f. corresponds to 87.5 kv. between line conductors at the switching point at Denver. The current, when the equilibrium is reached, is 4.6 amperes referred to the high tension side.

In closing the switch the oscillation of the e. m. f. lasts 2.5 cycles and the maximum voltage is 28 % higher than the maximum e. m. f. with the Denver-Boulder section connected. The distortion of current due to the excitation of the step-up transformer lasts more than 25 cycles, and the rush of current reaches a value of about 350 % higher than the maximum value of the normal current.

In opening the switch the oscillation consists of two parts, the first lasting less than one cycle and the second lasting several cycles. The second part is due to the exchange of energy between the Denver-Boulder line and the step-up transformer and has decreasing frequency owing to the increased value of the induction in the transformer.

The oscillation of the current lasts about $^3/_4$ cycle. There is no over-tension in opening the switch and the current reaches a value 240 % higher than the maximum value of the normal current.

Record 24 is taken under conditions identical with those of record 23. The maximum voltage is 21 % above the maximum

Digitized by Google

normal value in closing the switch and there is no over-tension in opening the switch.

Record 25 is similar to the two preceding records with the difference that the voltage across high tension conductors is 42.9 kilovolts. This result is obtained by changing the ratio of transformation of the 2500 kv-a. step-up transformer, which in record 23 and 24 was 6.52 and in record 25 is 3.26.

The theory of the phenomena covered by these oscillograms is known (1).

When the two parts of the circuit under investigation are connected or disconnected, the oscillation consists of a wave of fundamental frequency corresponding to normal running conditions on which is superimposed a damped oscillation whose frequency is determined by the constants of the circuit. In switching off one part of the circuit from the other, the main oscillation described above may be followed by individual oscillations of each of the two parts of the circuit at its own natural frequency.

During the period in which the two parts of the circuit are still connected by long and unsteady arcs the two kinds of oscillations may co-exist, the main oscillation becoming weaker and the individual oscillation gaining preponderance as the connection between the two parts of the circuit becomes less steady and less rigid.

The frequency at which energy is exchanged between the two parts of the circuit while being connected or disconnected is comparatively low when — as in our case — the capacity and inductance of the circuit are high, but there is possibility of resonance.

The phenomenon is further complicated by the behaviour of the high-tension oil switch, whose characteristics depend of course on its design.

Generally, however, the opening or closing of a high-tension oil switch is accompanied by the striking and dying out of several successive arcs before the metallic circuit is permanently closed or opened.

---

(1) See *Transient Electric Phenomena and Oscillations* by Dr. C. P. STEINMETZ.

Digitized by Google

Another complication may arise from the possibility of the three switches of a three-phase system not operating simultaneously.

The final result is that each switching operation may produce several complex successive oscillations.

A review of the records reveals at once the fact that the over-tensions are never greater than 40 % of the normal maximum value of the e. m. f. This result corroborates the conclusions drawn by theoretical considerations.

On the other hand, high frequency is present in every record. 1.020 cycles corresponding to the full wave oscillation of 180 miles of line and 420 cycles, the 7th harmonic of the fundamental, occur most frequently.

It must be remembered, however, that the oscillograms represent the phenomena taking place on the low-tension side of the step-up or step-down transformers, but do not include the impulses which may occur on the high-tension side of the apparatus and may be so steep in wave front that they are not transmitted through the iron to the low tension side.

In order to obtain an idea of the importance of these impulses, choke coils were inserted in series with line conductors and a spark gap was connected in parallel with each choke coil.

The maximum sparking distance of the gap was recorded for every switching operation, and it gives the product of the intensity of the current times the steepness of the wave front.

Fig. 2 and 4 show the location of the choke coils during the experiments.

Each choke coil consists of 34 turns of half inch copper rod. The inside diameter is $5\,^1/_2''$, the outside diameter $6\,^1/_2''$, the total height 32".

The inductance of the choke coil is 0.0326 millihenry, so that 100 amperes at 60 cycles would give across the coil a drop of 1.26 volts.

Each switching operation was repeated several times and the following table gives the maximum sparking distances obtained across the coils.

Digitized by Google

Test N°	Record N°	Switching	Sparking Distance
A-1	1	Off	7/8″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
A-2	2	On	1/4″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
A-2	3 & 4	Off	1/2″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
A-3	5	On	3/4″ at switching point. Less than 1/8″ at end of line.
	5	Off	3/4″ at switching point. Less than 1/8″ at end of line.
A-4	6	Off	Less than 7/8″ at switching point. Less than 1/8″ at end of line.
B-1	7 & 11	On	1/2″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
	10 & 11	On	1 1/4″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
B-2	12 & 13	On	1/2″ at switching point. Less than 1/8″ at end of line.
	14, 15, 16	Off	1-3/8″ at switching point. Less than 1/8″ at end of line.
C-1	18	On	7/8″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
	17 & 18	Off	3/4″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
	19	Off	3/4″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
C-2	20	On	Less than 5/8″ at switching point. Less than 1/8″ at beginning of line.
	21	Off	1″ at switching point. Less than 1/8″ at beginning of line.
D	22	On	Less than 1/4″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
		Off	Less than 1/4″ at switching point. Less than 1/8″ at power house.
E	23, 24, 25	On & Off	Less than 1/8″ at any point.

Digitized by Google

The frequency of the impulses as indicated by the above table is very high. In the case for instance of Test B-2 — switching off — the maximum sparking distance is $1\,^3/_8''$, corresponding to 22.000 volts across the choke coil (the spark gap was at an altitude of 5.000 ft.). Now, the maximum rush of current through the choke coil under the conditions of Test B-2 was 130 amperes. A sine wave current whose maximum value is 130 amperes would give across the choke coil at 60 cycles a drop whose maximum value is 1.63 volts. It follows that the impulse in case of test B-2 corresponds to a minimum frequency of 820.000 cycles.

The possibility of such local high frequency, high voltage stresses resulting from high tension switching, is an element of danger to high-tension apparatus.

It seems therefore that our common method of protecting transmission systems by lightning arresters connected in series with a spark gap does not safeguard the apparatus from the impulses described above, although it is effective when a high difference of potential is produced across phase conductors or to ground.

We can conclude that proper protection against these high frequency impulses is necessary and that at the same time high-tension switching, which gives origin to these impulses, should be avoided or reduced as much as possible. For instance, when a new line is to be energized, two methods of switching may be followed.

First: The line — open at the far end — is switched in at the power house and then the step-down transformer is connected to the end of the line.

Second: The step-down transformer is connected to the end of the dead line and then line and transformer — as a unit — are switched in at the power house.

The records show that this second method is very much preferable, as it produces only one oscillation similar to the less severe of the two oscillations produced by the first method.

Furthermore, it must be noted that the presence of transformers at the switching point is generally responsible for the high frequency impulses at that point.

For instance, in Test D no appreciable sparking distance could be measured across the choke coil at the switching point, because no transformers were connected at that point.

If there are no transformers at the switching point, high-tension switching cannot be avoided, but no danger arises there-

Digitized by Google

from, especially as high frequency impulses — as shown by the tests — are local and do not travel any considerable distance along the line.

But if transformers are connected at the switching point, then low tension switching may be arranged for in many cases.

Digitized by Google

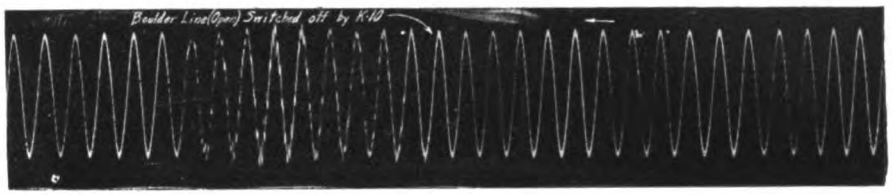


Fig. 1.

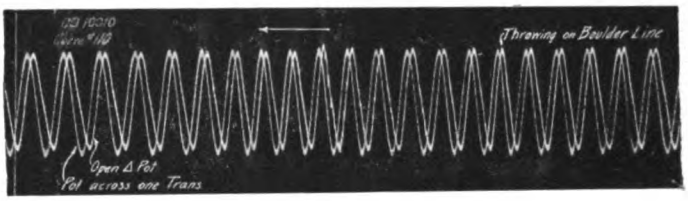


Fig. 2.

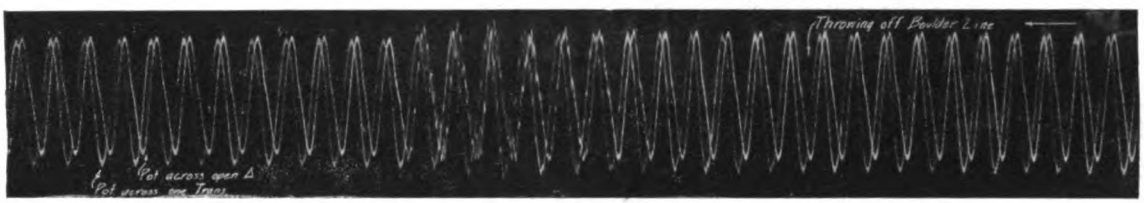


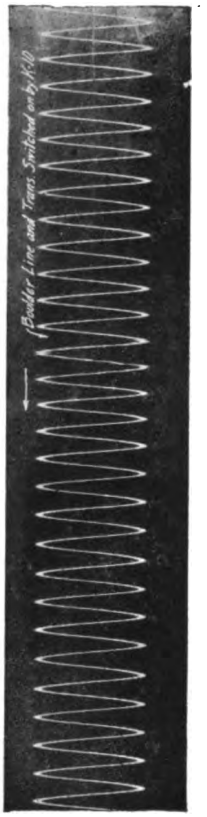
Fig. 3.

G. FACCIOLI.

Digitized by Google

Fig. 4.

Fig. 5.



Segue Fig. 5.

Digitized by Google

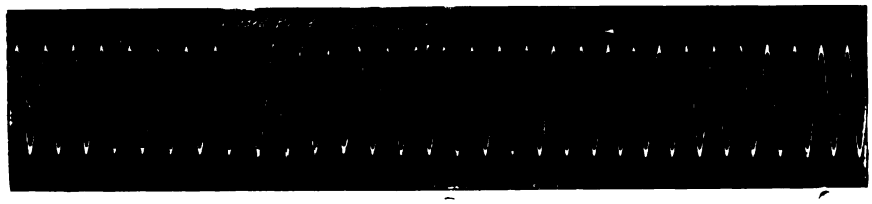


Fig. 6.

Fig. 7.

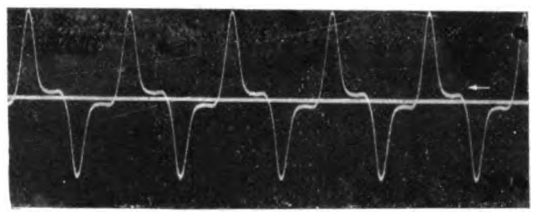


Fig. 8.

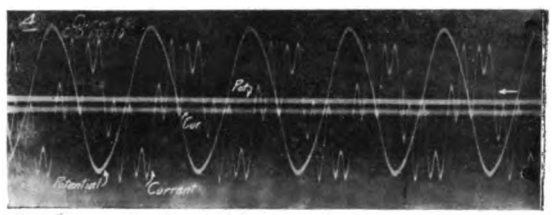


Fig. 9.

G. FACCIOLI.

Digitized by Google

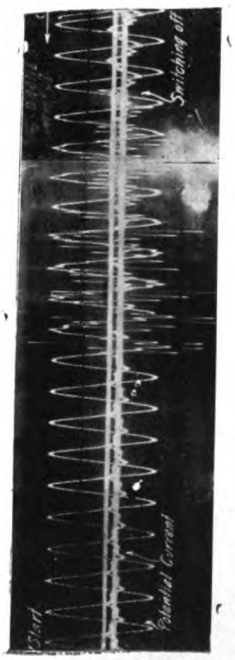


Fig. 10.

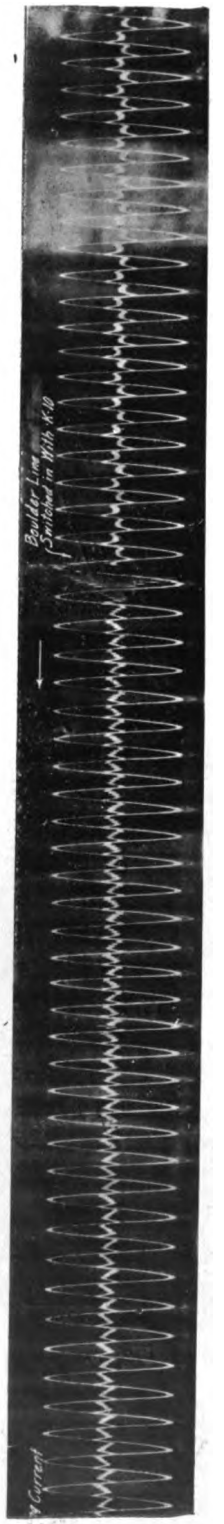


Fig. 11.

Segue Fig. 11.

Digitized by Google

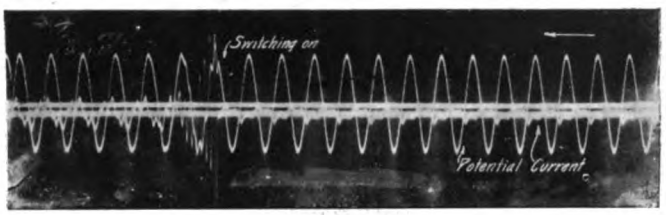


Fig. 12.

Fig. 13.

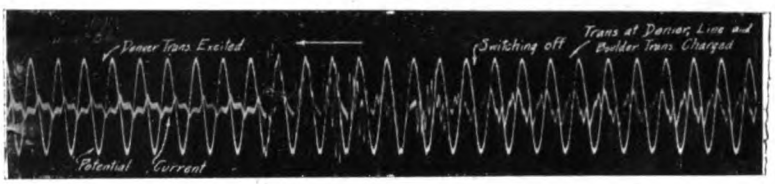


Fig. 14.

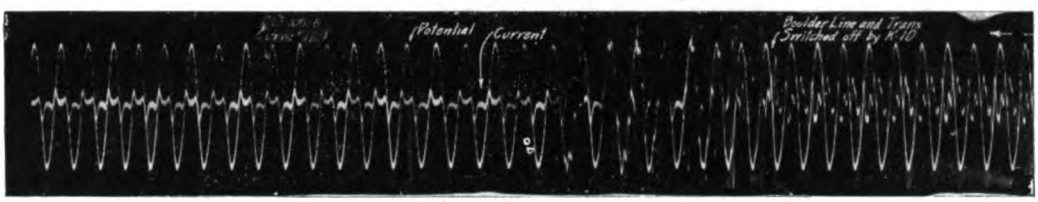


Fig. 15.

Digitized by Google

Fig. 16.

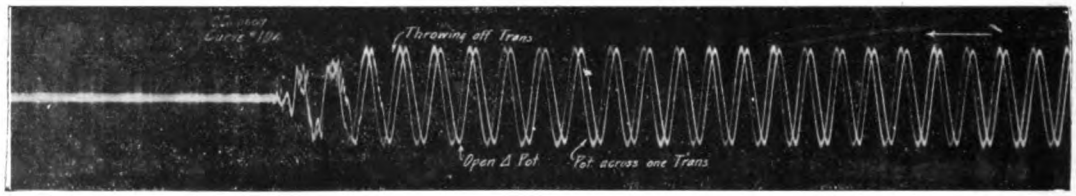
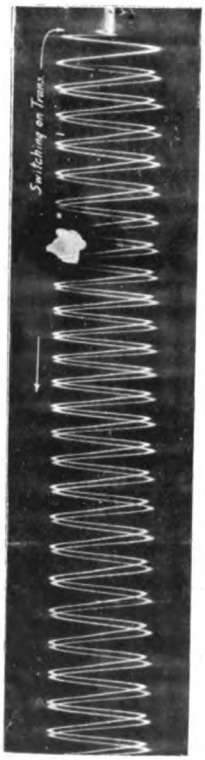


Fig. 17.

Fig. 18.



Segue Fig. 18.

Digitized by Google

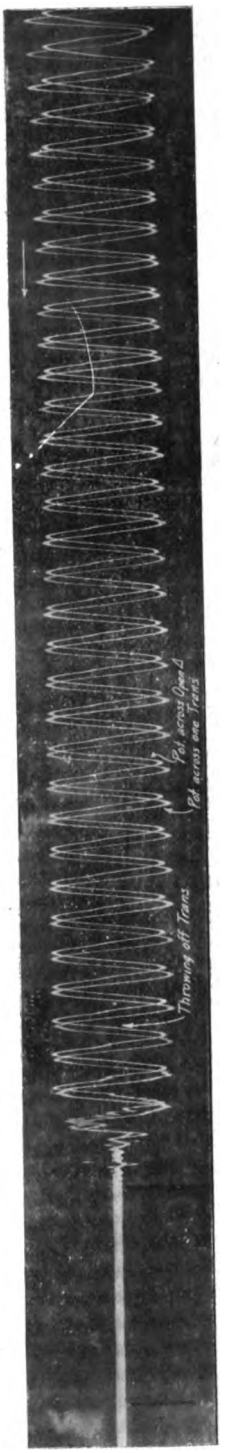


Fig. 19.

Fig. 20.

Segue Fig. 20.

Digitized by Google

Fig. 21.

Segue Fig. 21.

Digitized by Google

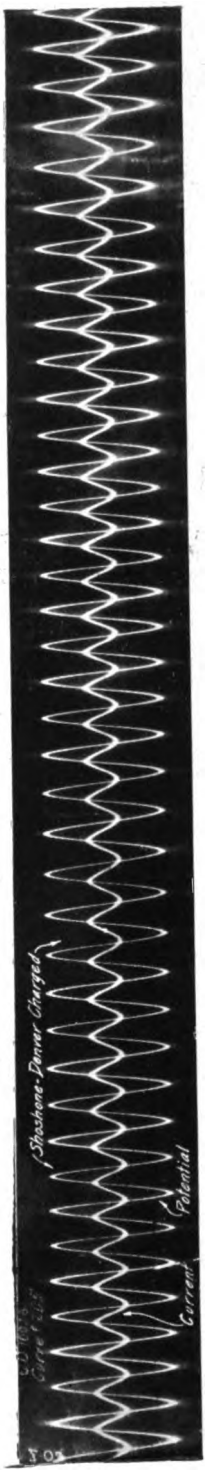


Fig. 22.

Segue Fig. 22.

Digitized by Google

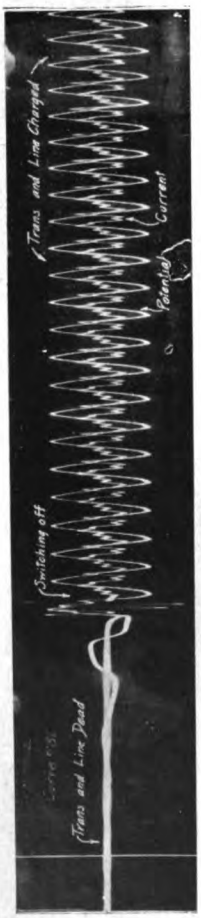
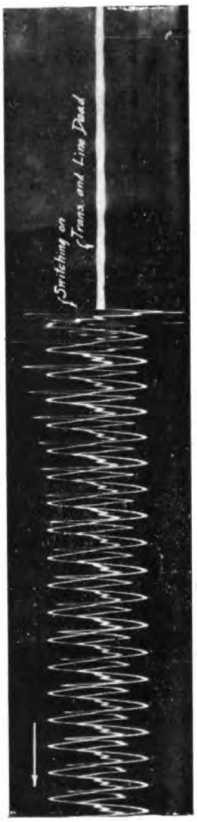


Fig. 23



Segue Fig. 23.

Digitized by Google

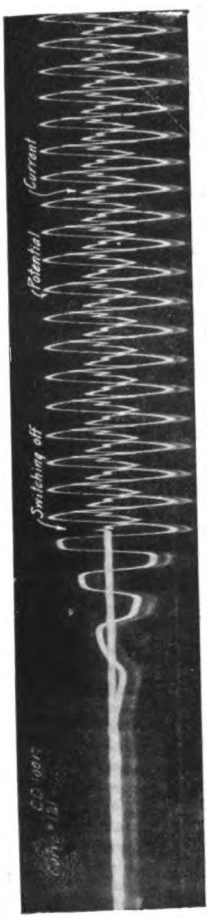
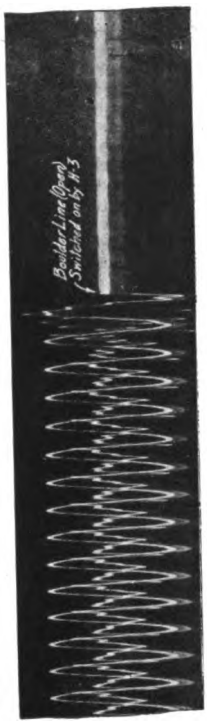


Fig. 24.



Segue Fig. 24.

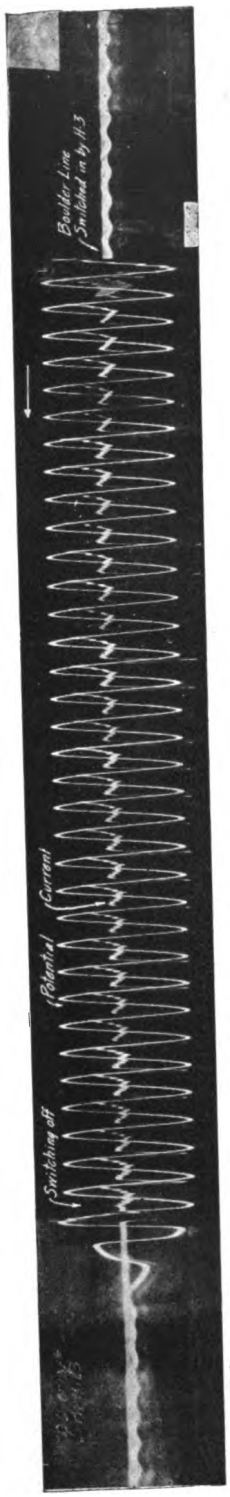


Fig. 25.

Digitized by Google

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Dans le courant de l'été de 1910, des expériences furent instituées sur la ligne de la Central Colorado Power C^y, pour y étudier les oscillations que provoque la manœuvre des interrupteurs à huile et à haute tension.

La figure 1 représente le schéma des lignes de la Central Colorado C^y.

A l'époque de ces expériences, l'énergie était produite par des alternateurs trifasés de 5000 KW fonctionnant dans la Centrale de Shoshone.

Ces alternateurs étaient montés en étoile, avec le neutre à la terre.

La tension normale était de 4000 volts de phase à phase, à la vitesse de 400 tours par minute.

La ligne fonctionnait à 95.000 volts, 60 périodes par seconde.

La figure 2 donne le schéma du montage et des attaches dans la Centrale, où 3 transformateurs monophasés de 3333 KVA reliés en triangle élèvent la tension de 4000 à 95.000 volts.

Entre la haute tension des transformateurs et la ligne, il n'existe pas, dans la Centrale, d'interrupteurs à huile.

La ligne est constituée par trois câbles cordés de 6 fils de cuivre; elle est disposée sur un plan horizontal où la distance entre deux câbles adjacents est de 3^m,150.

La longueur totale, de Shoshone à Denver, est de 247 Km., dont les 3 tronçons consécutifs mesurent: Shoshone-Leadville, 102 Km.; Leadville-Dillon, 50 Km. et. Dillon-Denver, 95 Km.

La distance entre Denver et Boulder est de 44 Km.

La ligne traverse le Continental Divide en trois points:

1° Entre Shoshone et Leadville, à 3660 m. d'altitude;

2° Entre Leadville et Dillon, à 3810 m.;

3° Entre Dillon et Denver (au Pas de l'Argentine) à 4180 m.

La figure 3 indique les poteaux en treillis qui portent la ligne au moyen d'isolateurs à suspension à 4 disques en porcelaine.

La figure 4 est le schéma des attaches dans la sous-station de Denver,

Digitized by Google

telles qu'elles existaient à l'époque des expériences. Dans ce schéma, les interrupteurs B et G sont identiques et du type à huile pour hautes tensions; les interrupteurs A et H, identiques aussi, sont du type à huile pour basses tensions. F sont des couteaux séparateurs triphasés.

A l'époque où lesexpériences furent instituées, le courant était totalement fourni par la Centrale de Shoshone; maintenant il vient aussi de Boulder.

Dans la Centrale de Denver, la ligne venant de Shoshone se reliait à deux transformateurs de 2500 KVA, 95.000/13.200 volts, montés en triangle ouvert, par l'intermédiaire des interrupteurs G.

Les interrupteurs B pouvaient, au besoin, unir la ligne de Denver à Boulder aux barres de la haute tension, comme l'indique la fig. 4; mais, dans la plupart des expériences, cette ligne, dont on isolait un conducteur, a fonctionné en monophasé et a été reliée à l'enroulement à haute tension d'un des transformateurs de 2500 KVA, dont l'enroulement à basse tension se reliait, à son tour, aux barres de la sous-station de Denver, alimentée par Shoshone.

La figure 4 montre encore le schéma des attaches dans la sous-station de Boulder, où la ligne à haute tension se relie, par le moyen des couteaux séparateurs C, à l'enroulement à haute tension de trois transformateurs monophasés de 3333 KVA (Rapp. de 12 $^1/_2$ à 1) montés en triangle sur la basse tension, et en étoile sur la haute. Ici, le neutre n'était pas à la terre.

Dans la plupart des expériences, on ouvrait et on fermait les interrupteurs d'une section de ligne fonctionnant à vide, la reliant à une autre section de la ligne, ou l'en séparant, suivant les circonstances de l'expérience.

Voici le détail des expériences:

A) *Réunion et séparation des sections Denver-Boulder et Shoshone-Denver, au moyen d'interrupteurs à haute tension.*

B) *Réunion et séparation, au moyen d'interrupteurs à haute tension, de la ligne monophasée Denver-Boulder avec l'enroulement à haute tension d'un transformateur de 2500 KVA alimenté par les barres à basse tension de Denver.*

C) *Réunion et séparation, au moyen d'interrupteurs à haute tension, d'un transformateur fonctionnant à vide à l'extrémité de la ligne.*

D) *Réunion et séparation, au moyen d'interrupteurs à haute tension, d'une ligne triphasée située à l'extrémité d'une autre ligne triphasée travaillant à vide.*

E) *Réunion, au moyen d'interrupteurs à basse tension, de la section monophasée Denver-Boulder et d'un transformateur élévateur de 2500 KVA aux barres de basse tension de la sous-station de Denver.*

Digitized by Google

La théorie de ces oscillations a été exposée par le Dr. C. P. Steinmetz *dans son livre " Transient electric Phenomena and Oscillations „.*

Les expériences que l'Auteur décrit révèlent dès l'abord que les surtensions ne dépassent jamais la valeur de 40 % du maximum normal de la force électromotrice, et, en second lieu, que les oscillations sont toujours d'une fréquence très élevée; on a souvent constaté des fréquences de 1020 et de 420 périodes; la septième harmonique de la fondamentale se manifeste le plus souvent.

Il convient toutefois de noter que les oscillations étudiées sont celles qui se produisaient dans les enroulements à basse tension des transformateurs élévateurs ou réducteurs de tension, et non les pulsations des enroulements de la haute tension, lesquelles peuvent atteindre des pointes telles qu'elles n'arrivent pas à traverser le fer pour influencer la basse tension.

Pour se rendre compte de l'importance de ces pulsations, on a inséré des bobines de réactance en série avec les conducteurs de la ligne ayant un éclateur monté en parallèle avec chacune de ces bobines et on a enregistré, dans chaque manœuvre, la plus grande distance explosive qui donne le produit de l'intensité du courant par le degré d'acuité de la pointe de l'onde. Les figures 2 et 4 montrent la position des bobines de réactance pendant l'expérience, et les plus grandes distances explosives obtenues à travers ces bobines sont classées dans un tableau spécial. On y voit que la fréquence des pulsations arrive à des hauteurs considérables; dans une expérience on l'a évaluée à 820.000 périodes (distance explosive maximum $9^{m}/_{m}$, 5 correspondant à 22.000 volts à travers la bobine).

La possibilité de fréquences aussi élevées et d'aussi fortes surtensions consécutives à la manœuvre des interrupteurs à haute tension constitue une condition dommageable pour les appareils. Il ne paraît pas que le système en usage qui consiste à protéger les réseaux de transmission par des parafoudres reliés en série avec un éclateur, puisse garantir suffisamment les appareils contre les effets nuisibles des pulsations qu'on vient de décrire. Il est donc nécessaire de songer à quelque moyen de protection plus efficace et, entre temps, d'éviter le plus possible la manœuvre d'interrupteurs à haute tension susceptibles de provoquer des pulsations aussi importantes.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. le Président A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.) *déclare ouverte la discussion sur les deux communications et le Rapport présentés par M. Faccioli. Il remercie M. Faccioli de ses intéressantes communications et de son Rapport; l'ensemble de ces travaux constitue une précieuse contribution à une question de haut intérêt pour les installations électriques.*

Le travail du Dr. STEINMETZ *résume ses travaux bien connus sur les courants variables et la façon de les traiter, et M.* KENNELLY *rappelle les théories qu'il a lui-même développées et exposées il y a longtemps sur le même sujet.*

M. CREIGHTON, *au contraire, classifie fort utilement les causes diverses qui engendrent les surtensions, les appareils qu'il estime efficaces pour la protection des installations contre les effets de ces surtensions, et les conditions techniques et économiques dans lesquelles ces appareils sont appelés à fonctionner.*

Enfin, M. FACCIOLI *a exposé les résultats d'expériences extrêmement importantes ainsi que les mesures qu'il a relevées sur les phénomènes consécutifs aux manœuvres que l'on exécute habituellement sur les lignes électriques. Le travail de M. Faccioli fournit à la fois d'utiles indications sur le mode le plus convenable d'opérer ces manœuvres et de précieuses instructions relatives à la sûreté des installations.*

M. G. CAMPOS (Milan) *s'associe entièrement aux conclusions de M. Faccioli en ce qui regarde l'existence de hautes fréquences dans le plus grand nombre des cas de surtensions, surtout quand elles sont dues à des manœuvres sur les lignes, et il convient avec lui de la nécessité de combattre les effets de ces surtensions par des dispositifs spéciaux. Les observations qu'il pourrait faire à ce sujet et les déductions qu'il pourrait en tirer sont contenues dans sa propre communication, inscrite à l'ordre du jour de cette même séance; aussi n'insiste-t-il pas sur un argument qu'il va être appelé à développer. Il désirerait seulement un éclaircissement: dans les expériences de M. Faccioli, on a noté la fréquence des oscillations en déterminant la distance explosive entre les extrêmes d'une*

Digitized by Google

self-inductance de valeur connue; mais quelle valeur a-t-on attribuée à l'intensité du courant de haute fréquence? Cette valeur peut être parfois une composante très petite de l'intensité indiquée par les instruments et, dans ce cas, la fréquence due aux oscillations en serait augmentée d'autant. Ceci serait, en outre, une preuve de l'existence de surtensions excessivement rapides.

M. G. FACCIOLI (Pittsfield Mass.). — *On a pris, dans nos expériences, l'intensité que les instruments attribuaient au courant de la ligne; il faut donc interpréter comme un minimum les fréquences notées, et il est très probable qu'il y ait, dans les phénomènes de surtensions qui se produisent à la suite de manœuvres ou d'autres causes, des oscillations de fréquence beaucoup plus élevée.*

M. M. PIZZUTI (Naples) *est d'avis, lui aussi, que les conclusions du Rapporteur confirment l'opinion que des mesures de protection sont nécessaires contre les oscillations de haute fréquence. A l'appui de cette opinion il renvoie au Mémoire qu'il présente au Congrès sur un système qu'il a imaginé en collaboration avec M. l'Ing. Ferrari contre les surtensions (Type " Sig „).*

M. A. DINA (Palerme). — *Ayant participé, il y a plusieurs années (et avant que les Américains ne s'en occupassent), à des expériences instituées en vue de la construction de paratonnerres à condensateur d'aluminium, il a constaté certains défauts dans ces paratonnerres. Il voudrait savoir du Rapporteur si ces défauts existent encore dans les types modernes. Il serait à désirer, avant tout, qu'on insérât ces condensateurs à électrodes d'aluminium, directement entre les fils de ligne et la terre, et sans interposer dans le système un paratonnerre à espace d'air. Mais cela n'est pas praticable dans les installations à courant alternatif, car, même quand chaque élément isolé, inséré à la tension correspondante, ne présente aucun échauffement anormal, quelques-uns d'entre eux s'échauffent excessivement quand plusieurs de ces éléments sont insérés en série sous une tension élevée. Selon toute probabilité, ce phénomène est dû au fait que les divers éléments, bien que de dimensions identiques et soumis aux mêmes procédés de formation, possèdent parfois des capacités différentes, dues à quelque impurité de l'aluminium et que ces impurités, même quand elles ne se rencontrent qu'en très faibles quantités exercent encore une notable influence sur l'échauffement des éléments soumis au passage du courant. Il en résulte que les éléments en série supportant des tensions différentes, certains d'entre eux s'échauffent trop. Une fois qu'on doit se servir, en surcroît, d'un paratonnerre à intervalles d'air, les éléments en aluminium se com-*

Digitized by Google

porteront différemment vis à vis de simples résistances d'extinction par ce seul fait que les surtensions, outre qu'elles auront franchi les espaces d'air, auront aussi perforé les diélectriques. Il en résulte que ces éléments ne leur opposeront plus qu'une résistance assez faible, tandis que celle qu'ils présentent au courant de l'installation restera très élevée.

Les éléments d'aluminium, quand ils se trouvent séparés de la ligne par un paratonnerre à espaces d'air, n'étant plus normalement soumis aux tensions, voient s'affaiblir leur propriété modératrice du courant normal. Pour remédier à ce défaut il y a lieu de les soumettre fréquemment aux tensions, ce qui peut constituer un embarras sérieux dans les installations. Le courant continu se prête mieux à l'emploi des éléments d'aluminium, car dans les installations où ce genre de courant est employé, le courant de charge n'intervenant pas, il n'y a pas lieu aux échauffements qui se manifestent avec le courant alternatif; on peut donc insérer des éléments d'aluminium sans qu'il soit nécessaire d'interposer un paratonnerre à intervalles d'air.

M. G. Faccioli (Pittsfield Mass.) *reconnaît l'objection de ne pouvoir insérer directement ces paratonnerres et de nécessiter périodiquement les " formations „ sous tension. Il ajoute que, dans la pratique, à cet inconvénient n'est pas aussi sérieux qu'on peut le supposer. Des expériences en cours permettent, d'ailleurs, d'espérer qu'on arrivera l'éliminer de la même façon qu'on est arrivé à corriger graduellement les autres défauts que M. le Prof. Dina a signalés; un type, dit-il, est en ce moment à l'étude qui devra satisfaire à tous les desiderata exprimés.*

Digitized by Google

LA PROPAGAZIONE

DELLE

SOVRATENSIONI OSCILLATORIE

Sistema di protezione con dispositivi per lo smorzamento

Ing. GINO CAMPOS (Milano)

Benchè lo studio teorico e le prime applicazioni pratiche del sistema, oggetto della presente Comunicazione, siano troppo recenti, perchè io possa qui portare altresì il risultato delle applicazioni stesse, mi è sembrato non fosse fuori di luogo esporre succintamente al Congresso le vedute che si collegano a tale mio sistema: tanto più che i fondamenti di esperienza che sono base delle vedute stesse coincidono con le idee recentemente espresse in proposito dall'egregio relatore signor Faccioli al Convegno annuale dell'Istituto Americano.

Sarò, come dissi, assai succinto, giacchè un'esposizione più ampia della questione è stata già oggetto di una Comunicazione alla Sezione di Milano dell'A. E. I., che venne ora pubblicata, e che è a disposizione dei Signori Congressisti.

Quanto ai fondamenti di esperienza accennati, essi riguardano specialmente la natura e la forma dei fenomeni vari e talora oltremodo complessi che si designano col nome di *sovratensioni*, e che possono essere dovuti sia a perturbazioni atmosferiche, sia al funzionamento dell'impianto elettrico in cui hanno luogo.

Benchè sia ancora molto discussa, infatti, tanto la entità di tali sovratensioni quanto la natura oscillatoria o no, e la frequenza o

Digitized by Google

quanto meno la rapidità delle medesime, sembra dal complesso di molteplici osservazioni ed indizi che i maggiori pericoli da esse presentati siano dovuti:

1° a frequenze relativamente basse unite ad alte tensioni, specialmente se si producono riflessioni o onde stazionarie;

2° ad alte frequenze o rapide variazioni, unite a tensioni anche basse, e tanto più se con tensioni elevate e colla formazione (qui ancor più facile) di onde stazionarie.

Contro il primo pericolo sono specialmente protetti naturalmente gli impianti ad alta tensione; quelli ad altissima tensione possono forse anche arrischiarsi (dati gli inconvenienti dei più efficaci sistemi di protezione) a limitarne o ad abolirne l'impiego.

Contro il pericolo delle alte frequenze (che minaccia specialmente l'esistenza degli avvolgimenti induttivi) gli impianti ad alta ed altissima tensione sono in condizioni altrettanto cattive quanto gli impianti a bassa tensione.

E poichè nelle onde stazionarie e nelle sovratensioni per riflessione sono specialmente da considerare le componenti d'alta frequenza in oscillazioni fondamentali meno rapide, è specialmente nelle alte frequenze che sembra si debba vedere il principale nemico degli impianti elettrici. Tenendo specialmente presente che, quando importa considerare la *rapidità di variazione* dello stato elettrico, non vi è spesso differenza sostanziale tra *oscillazioni* e *variazioni aperiodiche*; queste ultime, infatti, possono scindersi in una serie, eventualmente infinita, di oscillazioni smorzate sovrapposte; e perciò, benchè la trattazione non sia sempre la stessa, le questioni relative *a rapide variazioni o ripide fronti d'onda* possono considerarsi come rientranti nelle questioni che riguardano le rapide, spesso estremamente rapide oscillazioni.

Ciò posto, per studiare la questione delle protezioni, riesce utile di considerare la propagazione delle sovratensioni lungo le linee elettriche, tenendo conto degli elementi delle medesime in modo analogo a quanto è stato fatto ad esempio per le trasmissioni telefoniche; e tenendo altresì conto dei fenomeni particolari, relativi alle alte frequenze, fenomeni che la tecnica moderna ha avuto occasione di approfondire, specialmente in seguito alle ricerche ed applicazioni radiotelegrafiche; giacchè appunto le frequenze da considerarsi nel nostro caso sono quelle impiegate in radiotelegrafia.

Digitized by Google

Così, la legge di propagazione e di smorzamento delle sovratensioni può prendersi in modo abbastanza approssimato sotto la forma nota

$$V = V_0 e^{-\beta l}$$

dove β coefficiente di attenuazione colla distanza l è dato da

$$\beta = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{K}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

indicando con R K L C rispettivamente i valori *equivalenti o effettivi* della resistenza, conduttanza d'isolamento, induttanza e capacità per unità di lunghezza, supposti tali valori uniformemente distribuiti lungo la linea ed eventualmente lungo i dispositivi in essa impiegati.

Si deve in modo speciale insistere su tale significato di *valori equivalenti o effettivi*; R e K corrispondono all'*energia totale dissipata* per effetto della corrente (R) e della tensione (K), L e C corrispondendo invece all'*energia totale immagazzinata* per effetto della corrente (L) e della tensione (C).

E così, nel mentre non è affatto trascurabile la conduttanza effettiva K di isolamento, potendo anzi questa (per effetto, p. es., degli effluvi o di perdite per isteresi dielettrica) acquistare un'importanza predominante nell'attenuazione, così analogamente è da considerarsi a queste alte frequenze la resistenza R dovuta allo *skin effect*, ben superiore all'ordinaria resistenza ohmica.

Non solamente; ma possono nel caso nostro acquistare valori notevolissimi, se non addirittura predominanti, i fenomeni di *radiazione elettromagnetica*, analogamente a quanto (su maggior scala) accade nelle antenne radiotelegrafiche.

Dovrà così considerarsi la possibilità di una forte resistenza R di radiazione come in tali antenne; e su questa potrà influire l'andamento del percorso delle oscillazioni, ossia della linea elettrica, secondo che è più o meno accidentato.

Dovrà pure considerarsi la possibilità di una non trascurabile conduttanza K d'isolamento, dovuta alla componente elettrostatica di tale radiazione, e producente (come nelle trasmissioni radiotelegrafiche) una dissipazione d'energia nel terreno spe-

Digitized by Google

cialmente e una conseguente attenuazione; e su questa potrà influire la natura dei terreni attraversati dalla linea elettrica.

In ogni caso, l'espressione del coefficiente d'attenuazione mostra come questa sia direttamente prodotta dalla *dissipazione d'energia* lungo il percorso delle oscillazioni, cioè da R e da K, nel mentre l'effetto di queste viene regolato dal rapporto fra gli altri 2 coefficienti L e C; rapporto dal quale, come è noto, dipende pure la *riflessione* delle oscillazioni nei punti singolari del percorso.

Esaminando, sotto questo punto di vista, la propagazione delle sovratensioni, viene pure naturale di considerare e di classificare i dispositivi di protezione contro le medesime secondo ch'essi si riferiscono all'uno o all'altro dei 4 coefficienti R K L C. Essi possono così dividersi in 2 gruppi principali, l'uno relativo direttamente all'attenuazione e all'energia consumata, cioè a R e K, l'altro relativo specialmente alle riflessioni e onde stazionarie e all'energia immagazzinata, cioè a L e C. I dispositivi riguardanti la corrente, cioè R e L, saranno *in serie* sulla linea, quelli riguardanti la tensione, cioè K e C, saranno in *derivazione*.

Anche limitandosi ai veri dispositivi di protezione (tralasciando cioè quelli di *prevenzione* e simili) non sempre una netta ed esatta classificazione è possibile; così pure alcuni tra essi rientrano in due o più dei gruppi considerati, comprendendo parti che hanno funzioni ed effetti differenti.

In massima si osserva che, mentre le spirali di self ed i condensatori si riferiscono gli uni alla riflessione delle onde, gli altri alla formazione di punti nodali di tensione, come mezzo di protezione, la grandissima maggioranza degli altri dispositivi produce invece una brusca discontinuità di K (della conduttanza d'isolamento) coll' aumentare della tensione; alcuni in modo dipendente pure dalle frequenze, ma tutti in modo poco atto a scaricare con sicurezza le limitate sovratensioni di alta frequenza che pur possono essere assai pericolose; e in generale essi rappresentano un compromesso tra il desiderio di facilitare il loro funzionamento e la necessità di prevenire o limitare gli effetti della corrente di linea.

Nessun dispositivo trovasi che, pur permettendo un attacco diretto, senza discontinuità, tale da funzionare anche con piccole sopraelevazioni di tensione, presenti un notevole valore di K per le sovratensioni e insieme un isolamento praticamente perfetto per la corrente normale.

Digitized by Google

Così pure, tolto in parte il tipo di parafulmini Gola, che nella parte in serie presenta fenomeni complessi e può darsi possieda una non trascurabile resistenza effettiva, nessun dispositivo trovasi che sia in modo notevole relativo ad R, pur presentando una resistenza trascurabile alla corrente normale.

Di qui l'opportunità di ricercare due nuove serie di dispositivi, il cui funzionamento si riferisce alle sovratensioni contenenti alte frequenze o rapide variazioni.

Questo potrà ottenersi, per i dispositivi in serie, quando R trascurabile per bassa frequenza prenda valori notevoli alle frequenze elevate; per i dispositivi in derivazione, quando K trascurabile per bassa frequenza prenda valori notevoli alle frequenze elevate. In entrambi i casi essi varranno ad aumentare grandemente la dissipazione di energia delle alte frequenze, lasciando indisturbata la corrente di linea; e dovranno naturalmente modificare L e C soltanto quanto può ammettersi per il regolare funzionamento dell'impianto protetto.

Entrambe perciò le serie di dispositivi hanno per caratteristica il consumo della sola energia delle sovratensioni.

Tra le cause che probabilmente influiscono in modo notevole sulla dissipazione d'energia e attenuazione delle alte frequenze (come si è detto) è per le linee aeree la irradiazione di energia elettromagnetica, il cui effetto equivale a quello di una vera *resistenza di radiazione*. Tale effetto aumenta quasi certamente in corrispondenza di gomiti o bruschi risvolti o simili punti singolari della linea; e perciò può convenire di aumentare appositamente il numero e l'importanza di tali punti, come in almeno un impianto recentissimo è stato fatto.

Può forse anche convenire di provvedere la linea di opportuni prolungamenti o analoghe disposizioni, funzionanti per le alte frequenze a guisa di antenne radiatrici; la questione sembra meritare ad ogni modo di essere studiata.

Altra causa di dispersione naturale di energia per le alte frequenze è il fenomeno dello *skin-effect*. Anche questo può essere utilizzato, ricoprendo i fili di linea con uno strato sottile di materiale di alta resistività; questo opporrà assai maggior resistenza alle rapide oscillazioni che in esso si propagheranno, e tanto più se si impiega per tale strato del materiale magnetico, atto ad aumentare il fenomeno; le correnti normali troveranno invece il loro percorso indisturbato all'interno del conduttore. Alcuni esperimenti eseguiti al Reichsanstalt con oscillazioni di

Digitized by Google

frequenza sino a 300.000 ~ su fili ricoperti d'uno strato di nickel di soli 7/100 di mm. di spessore, hanno permesso di constatare l'aumento notevole di resistenza (oltre 4 volte tanto, rispetto a un filo nudo) per tali frequenze. Questo dispositivo costituisce una protezione assai semplice e non troppo costosa, da applicarsi alla linea, almeno per lunghi tratti in prossimità delle stazioni da proteggere.

Altri dispositivi sono costituiti dall'impiego opportuno di induttanze, resistenze e capacità, così combinate che l'insieme di esse possegga valori equivalenti della resistenza R o della conduttanza in derivazione K variabili colla frequenza nel senso desiderato.

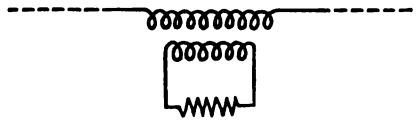


Fig. 1.

Così, per esempio (fig. 1), una induttanza in serie sulla linea, avente un secondario chiuso sopra una resistenza ohmica di conveniente valore, può presentare per le alte frequenze una resistenza equivalente fortissima, insieme a un'induttanza equivalente notevolmente diminuita. L'energia delle sovratensioni d'alta frequenza si dissipa nelle resistenze ohmiche del secondario, mentre questo non esercita sensibile reazione per le correnti di funzionamento normale. L'insieme comprende soltanto parti che possono isolarsi tra loro anche solo debolmente; non comprende alcuna parte in derivazione tra i fili di linea o a terra, rendendo così impossibili i corti circuiti e le loro conseguenze, anche in caso di eventuali guasti al sistema di protezione. Le resistenze ohmiche impiegate devono essere atte a sopportare fortissimi sovraccarichi momentanei.

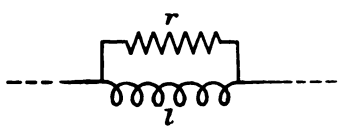


Fig. 2.

Analoghe proprietà ha un altro dispositivo, ancora più semplice (fig. 2), costituito da una bobina di self shuntata da una

Digitized by Google

resistenza ohmica. Anche qui la resistenza alle alte frequenze può essere grandissima ed anche qui non vi è alcuna parte in derivazione sulla linea, ottenendosi quindi la massima sicurezza; la corrente normale di funzionamento percorre la bobina di self e le alte frequenze vanno invece a dissipare la loro energia nella resistenza ohmica, opportunamente proporzionata e costrutta. Una serie di misure, queste pure eseguite al Reichsanstalt, hanno confermato esattamente, per frequenze varie sino a 450.000 $\sim$, le proprietà di tale dispositivo, e in particolare l'aumento fortissimo della resistenza equivalente, a tali frequenze, quali si ricavano dalle formole relative.

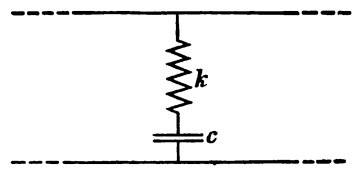


Fig. 3.

Tra i sistemi in derivazione, destinati ad aumentare notevolmente alle alte frequenze la conduttanza, il più semplice è costituito (fig. 3) dall'impiego di condensatori in serie con resistenze ohmiche. Questo diversifica dall'impiego dei soli condensatori, in quanto questi dànno luogo semplicemente ad una corrente di spostamento, swattata, alla quale solo si aggiunge per le alte frequenze la componente wattata dovuta alle perdite nel dielettrico o simili, oltre a quelle per la resistenza di terra se l'attacco è fatto a questa. L'impiego di resistenze ohmiche di valore opportuno, in serie coi condensatori, aumenta grandemente per le alte frequenze la conduttanza, producendo nelle resistenze stesse un forte consumo di energia delle sovratensioni e quindi aumentandone la attenuazione. Nel tempo stesso, avendosi un attacco diretto, senza spazi esplosivi, il dispositivo funziona ugualmente anche per quelle basse tensioni che non riescono a superare gli intervalli di aria nei tipi comuni di parafulmini, e che pure possono essere assai pericolose, se associate ad alte frequenze.

Naturalmente, i tipi accennati non sono che esempi delle disposizioni varie che si possono ottenere seguendo i concetti enunciati; possono infatti aversi dispositivi più complessi ricorrendo

Digitized by Google

ad elementi elettricamente non bene definiti, traendo, p. e., partito delle proprietà delle masse metalliche agenti per correnti indotte, o anche dei materiali magnetici agenti per isteresi magnetica, o di dielettrici aventi notevole isteresi dielettrica, o infine facendo uso di intervalli esplosivi per far entrare successivamente in azione varie parti o per avere delle specie di scaricatori in serie sulla linea.

È assai utile l'impiego simultaneo di sistemi in serie e di sistemi in derivazione; intercalati. Si ottiene a questo modo un sistema completo, presentante elementi abbastanza distribuiti perchè le 4 quantità relative all'insieme, R L C K, possano riguardarsi (con una certa approssimazione) come uniformemente distribuite nel tratto considerato, e consentano quindi un grossolano esame analitico dell'azione presumibile del dispositivo di protezione nonchè delle proporzioni, da darsi alle sue differenti parti, per soddisfare alle condizioni più opportune.

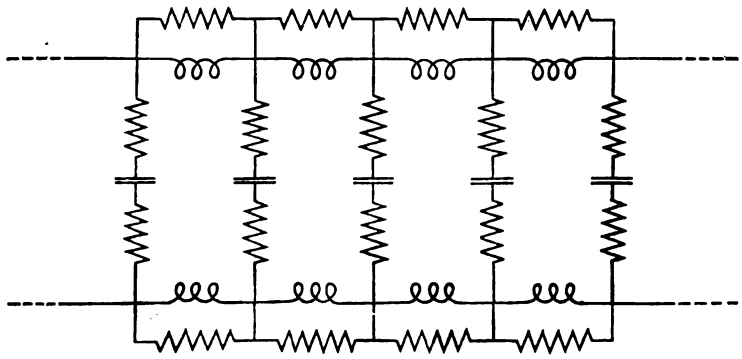


Fig. 4.

Un simile esame può, ad esempio, farsi agevolmente, adottando (fig. 4) in serie il dispositivo " *induttanza — resistenza tra loro in derivazione* „, e in derivazione il dispositivo " *condensatore — resistenza tra loro in serie* „. Ci si può allora proporre di proporzionare tali elementi in modo da eliminare le riflessioni d'onda contro il sistema di protezione; e ciò prendendo per i valori elementari l e c un rapporto $\frac{l}{c}$ uguale a quello che si ha per la linea su cui sono inseriti. E tale assenza di riflessioni si mantiene a tutte le frequenze quando i valori elementari $r\ l\ c\ k$ soddisfino alla relazione $\frac{r}{l} = \frac{k}{c}$, mentre allora ad analoga re-

Digitized by Google

lazione vengono a soddisfare a tutte le frequenze i valori equivalenti R L C K, cioè si ha pure $\frac{R}{L} = \frac{K}{C}$, relazioni queste notissime per la *non distorsione* delle onde.

Naturalmente da un calcolo di questo genere non si può sperare, al più, che l'ordine di grandezza degli effetti possibili, quando esso venga spinto sino a calcolare l'attenuazione corrispondente ad un gruppo di dispositivi e quando questi siano tali da prestarsi a simile calcolazione. Ad ogni modo i valori che a questo modo possono ottenersi, supponendo elementi perfettamente ammissibili in pratica per il regolare funzionamento della linea, indicherebbero che può sperarsi un'efficacia non piccola in simile sistema di protezione.

In un caso che ho esaminato, l'attenuazione sarebbe tale da ridurre la tensione d'arrivo delle oscillazioni a circa 1/3 per la frequenza 50.000 $\sim$, a meno del 7 % per 100.000 $\sim$, a meno dell'1,3 % per 200.000 $\sim$ e a circa il 0,5 % per frequenze tra 500.000 $\sim$ e 1.000.000 $\sim$. Anche facendo larghissima parte all'inesattezza di alcune ipotesi fondamentali e di altre accessorie, anche rammentando la grossolana approssimazione del procedimento di calcolo e dei dati introdotti, una simile conclusione lascia adito a sperare risultati non trascurabili da dispositivi di questo genere.

Ho già accennato ad alcuni esperimenti preliminari eseguiti in proposito. Oltre alla pratica applicazione, che sola può dire l'ultima parola sull'argomento, sarebbe certamente utile che una serie completa di esperienze (ch'io conto di potere, in parte almeno, presto iniziare) mettesse in luce non solamente le proprietà di simili dispositivi e dei loro raggruppamenti, ma anche le questioni varie che si collegano alla propagazione delle oscillazioni e in generale delle sovratensioni, nelle condizioni pratiche che a noi interessa esaminare.

Per quanto riguarda l'esame dei singoli dispositivi, la tecnica delle correnti d'alta frequenza, sviluppatasi specialmente a scopo di applicazioni radiotelegrafiche, fornisce oggidì dei mezzi sicuri e regolari di produzione di correnti d'alta frequenza di notevole potenza, nonchè i metodi e il materiale atti alla misura ed allo studio delle medesime. Si può così avere dei generatori d'oscillazioni, di frequenza regolabile, per alcune diecine di kilowatt, coi quali il funzionamento e le proporzioni dei dispositivi suddetti potrebbero essere abbastanza comodamente indagati. Per

Digitized by Google

rigore scientifico, sarebbe utile a tale scopo l'impiego di oscillazioni persistenti, quali possono ottenersi coll'arco cantante o con appositi generatori; ma anche le oscillazioni debolmente smorzate, già usate negli esperimenti preliminari, darebbero risultati abbastanza rigorosi, presentando il vantaggio di essere (allo stato attuale) tecnicamente più sviluppate, ed atte a notevoli potenze e ad una estesa regolazione; esse inoltre si accostano maggiormente alle condizioni che possono incontrarsi in pratica nelle sovratensioni, le cui componenti d'alta frequenza presentano probabilmente assai spesso smorzamenti considerevoli.

A questo modo, metodi calorimetrici in alcuni casi, e più spesso metodi wattometrici, possono permettere di verificare le dissipazioni di energia nelle resistenze o nei gruppi di resistenze impiegati; nel mentre che misure elettrostatiche o di distanze esplosive possono fornire valori delle tensioni fra i vari punti e quindi dell'attenuazione.

Volendo però estendere simili esperimenti all'insieme di più dispositivi, e da ultimo ad un vero complesso di protezione avente i valori adatti ad una pratica applicazione, e volendo ottenere valori non troppo limitati per le sovratensioni (tali da porne in evidenza l'andamento), ad un certo punto ci si troverebbe assai probabilmente arrestati dall'insufficienza delle potenze disponibili.

Per l'esame di tali complessi, della variazione dei loro valori equivalenti e dell'attenuazione loro alle varie frequenze, si può invece ricorrere all'impiego di correnti deboli e dei metodi usati in telefonia, proporzionando convenientemente i dispositivi studiati, in modo da estendere le variazioni accennate al campo delle frequenze telefoniche.

A questo modo, per frequenze di qualche centinaio o qualche migliaio di periodi, e facendo uso di un metodo di compensazione e del telefono, è stato a me possibile insieme al sig. Ing. Emanueli (al quale porgo sentite grazie) di verificare le proprietà dei sistemi " induttanza-resistenza „ e " capacità-resistenza „ e, nell'impiego di parecchi di tali gruppi intercalati, di tracciare (conoscendone i valori e le fasi) le onde propagantisi o riflettentisi in tali dispositivi, verificando così anche l'attenuazione e riconoscendo le proprietà teoricamente prevedibili.

Difficoltà analoghe a quelle sopra accennate di insufficienza delle potenze disponibili, s'incontrano quando su una linea, p. es., aerea, di notevole lunghezza si desidera verificare la

Digitized by Google

naturale attenuazione delle sovratensioni o delle rapide oscillazioni, e più ancora quando su essa si desiderassero sperimentare artificialmente dispositivi completi di protezione. Le perdite in derivazione specialmente (perdite superficiali sugli isolatori, *corona*, ecc.) e forse anche le perdite per irradiazione elettromagnetica, rendono assai difficile di raggiungere tensioni comodamente misurabili, senza aver disponibili potenze che non è agevole ottenere per le alte frequenze.

D'altra parte sarebbe assai utile approfondire la questione, attualmente assai poco nota, dell'irradiazione elettromagnetica e della relativa *resistenza e conduttanza di radiazione*. Tale questione non solo può gettare una utile luce sulla propagazione delle sovratensioni, e sull'utilità che può sperarsi da un artificiale aumento (quale ci siamo proposti ottenere) della *resistenza e conduttanza equivalente* del percorso delle oscillazioni, ma può anche fornire dati preziosi sull'influenza del tracciato della linea, su quella dei terreni attraversati e infine sull'impiego dei gomiti o dei prolungamenti intesi a fornire una protezione coll'aumento appunto di tale radiazione.

Un simile esame può invece assai probabilmente farsi sopra linee artificiali opportunamente costrutte. Rammenterò, a questo proposito, non solamente l'utilità delle linee artificiali, specialmente per lo studio delle questioni telefoniche e l'impiego recente fatto in America (dietro consiglio dello Steinmetz) di linee artificiali per lo studio della produzione di oscillazioni e sovratensioni durante le varie manovre sulle linee di trasmissione, ma anche e specialmente le proprietà e l'utilità dei modelli in scala ridotta per quanto riguarda le questioni radiotelegrafiche, e in particolare le proprietà radianti dei differenti tipi di antenne.

Allo stesso modo, infatti, che in altri rami dell'ingegneria, con opportune ipotesi e tenendo conto delle relative leggi di proporzionalità, si può far uso di adatti modelli per lo studio di questioni varie (p. es., le questioni riguardanti la stabilità, le oscillazioni, la propulsione delle navi), così anche in alcune questioni di elettrotecnica è utile l'impiego di modelli; e nello studio delle antenne radiotelegrafiche si constata che la loro resistenza equivalente di radiazione è uguale a quella misurata sopra un modello proporzionale, di ridotte dimensioni.

Metodi analoghi di ricerca possono probabilmente applicarsi con successo allo studio di alcune proprietà riguardanti la pro-

Digitized by Google

pagazione dalle sovratensioni, le protezioni relative e in particolare quanto riguarda la eventuale radiazione elettromagnetica. Non sembra presentare troppe difficoltà lo stabilire un opportuno modello d'una linea di trasmissione, in cui le distanze tra i fili e la terra dovrebbero essere proporzionali al vero, mentre, p. es., i diametri dei fili (dai quali è largamente indipendente la radiazione) potrebbero stabilirsi con concetto differente, p. es., di riprodurre e studiare i fenomeni di *skin-effect* o meglio di dispersione d'energia per *corona*; su tale linea si potrebbe anche esaminare il funzionamento di alcuni dispositivi di protezione opportunamente proporzionati. Le frequenze da impiegarsi dovrebbero essere probabilmente maggiori delle vere, corrispondenti cioè a lunghezze d'onda proporzionali alle vere nella scala stessa del modello, ciò che dal lato pratico della generazione delle oscillazioni costituisce un vantaggio. La verifica delle riflessioni, delle onde stazionarie, dei punti nodali o ventrali sarebbe facilitata dall'impiego di tali maggiori frequenze; e specialmente si avrebbe il vantaggio che le potenze disponibili equivarrebbero, nei loro effetti ridotti, a potenze molto maggiori agenti su di una linea reale.

Senza voler troppo pretendere da un simile modello, sembra però che i probabili vantaggi di tale metodo di ricerca possano essere sufficienti a consigliarne ed a compensarne l'impiego. Per questo mi sono permesso di farne qui cenno.

E concludendo, malgrado i numerosi punti che ancora rimangono oscuri nelle questioni varie e complesse riguardanti le sovratensioni, e nel mentre continua la raccolta sempre più diligente di interessanti dati sperimentali, mi sembra che il materiale già raccolto permetta ormai di indirizzare questo studio su di una via abbastanza razionale, specialmente facendo uso delle cognizioni e dei metodi che la tecnica delle alte frequenze (nata dalla fisica e in particolare dallo studio delle perturbazioni elettromagnetiche, preceduta e accompagnata poi dalle rigorose ricerche telefoniche) mette oggidì a disposizione di una simile indagine, tanto importante dal lato tecnico ed economico delle trasmissioni elettriche.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

L'Auteur rappelle d'abord les considérations exposées dans un travail récemment présenté à l'Association Électrotechnique Italienne, sur la propagation et l'amortissement des surtensions, ainsi que sur quelques dispositifs nouveaux de protection.

Il indique comme particulièrement dangereuses les oscillations de haute fréquence et il en étudie la propagation au moyen des constantes de la ligne R L K C.

Après quelques remarques à propos du skin effect *et de la* radiation électromagnétique, *il fait ressortir l'opportunité d'augmenter artificiellement les pertes d'énergie et l'amortissement des hautes fréquences par une augmentation des valeurs effectives de la résistance R et de la conductance K, ce qui donne lieu à des séries nouvelles de dispositifs de protection.*

Quelques-uns de ces derniers sont ensuite décrits; par exemple:

1° fil de ligne recouvert par une faible couche de matière à haute résistivité;

2° bobines de self avec secondaire fermé sur une résistance ohmique;

3° bobines de self shuntées par une résistance ohmique;

4° condensateurs en série avec des résistances ohmiques.

L'Auteur rappelle des calculs et des essais préliminaires exécutés sur ces dispositifs, ainsi que la possibilité dans quelques cas de calculer d'une façon grossièrement approchée les effets probables.

Une vérification expérimentale de ces effets, ainsi que la reproduction et l'étude des phénomènes des surtensions, bien que très utiles, ne peuvent être que nécessairement limitées, surtout à cause de la puissance disponible nécessitée pour des oscillations de haute fréquence.

Dans quelques cas, particulièrement dans la vérification des amortissements, les méthodes téléphoniques peuvent être employées, pour des fréquences moins élevées.

Il serait probablement très avantageux d'étudier ces phénomènes, surtout ceux de la radiation électromagnétique, sur des modèles de lignes, reproduisant dans une échelle réduite les dimensions et les conditions

Digitized by Google

d'une ligne de transmission, et sur lesquels des oscillations de fréquence plus élevée devraient être employées; on pourrait aussi examiner, de même, le fonctionnement de plusieurs dispositifs de protection.

Dans tous les cas, l'emploi des méthodes et des connaissances relatives aux oscillations électriques semble devoir être d'une grande utilité dans l'étude de la question des surtensions.

DISCUSSION

M. U. Del Buono (Rome) *partage l'opinion que nombre des plus dangereux phénomènes de surtension sont de nature oscillatoire, et il croit très avantageux l'emploi de dispositifs basés sur cette supposition.*

Le système décrit dans la Communication, grâce auquel on tend à obtenir une véritable dissipation d'énergie dans le cas de hautes fréquences, lui semble particulièrement indiqué, et il exprime l'opinion qu'il devrait avoir une action efficace dans l'application pratique.

M. G. Faccioli (Pittsfield, Mass.). *Les conclusions de son Rapport, quant à l'existence de hautes fréquences dans les surtensions, et quant à l'opportunité d'étudier des moyens d'en combattre les effets, répondent aux considérations qui ont guidé l'auteur et l'ont conduit au système qu'il préconise. Il observe que, tandis qu'en Amérique on a fait de copieuses et importantes observations et recherches pour déterminer les conditions auxquelles un système de ce genre devrait s'adapter, en Italie on a suivi une toute autre route, qui conduira, lui semble-t-il, plus rapidement à des résultats très satisfaisants. Plus qu'un souhait ou une opinion, il exprime la conviction que le système proposé répondra parfaitement à ce que la théorie montre qu'on peut en attendre.*

M. G. Campos (Milan) *remercie M. l'ing. Faccioli du jugement favorable qu'il vient d'émettre à son égard; il met en relief l'importance toute spéciale des observations si copieuses et si exactes des Américains.*

M. C. Olivetti (Milan) *rappelle certains cas où le passage d'une ligne*

Digitized by Google

au-dessus d'une haute chaîne de montagnes semble avoir constitué une protection contre la propagation des effets dangereux des surtensions ou de décharges atmosphériques de l'un à l'autre versant. Il suppose que l'on puisse attribuer cette protection à une sorte d'atténuation due à de fortes pertes d'énergie sous forme d'effluves et au phénomène de " Couronne „ plus sensible à de grandes altitudes à cause de la raréfaction de l'air.

M. G. CAMPOS (Milan) *croit qu'un semblable effet puisse se produire; il a précisément signalé le phénomène de " Couronne „ parmi les principales causes naturelles de la dissipation des surtensions, et cela le conduit à penser que les installations à tension très élevée, qui fonctionnent à peine au-dessous de la limite de production de la " Couronne „, doivent être naturellement beaucoup mieux protégées que les autres. M. Creighton arrive aussi à cette conclusion dans sa Communication.*

Digitized by Google

SULLA PROTEZIONE DEGLI IMPIANTI ELETTRICI

Ing. G. Gola (Torino)

Le interessanti comunicazioni fatte al Congresso su questo argomento confermano che la preoccupazione generale dei tecnici è rivolta alle altissime frequenze: l'ing. Campos, nel suo studio pregevolissimo, esprime addirittura l'opinione che gl'impianti ad alta e ad altissima tensione si possono ritenere per sè stessi protetti dalle scariche di media frequenza.

Io non posso consentire in questi criterî, anzi devo dichiarare che l'esperienza che ho fatto sull'argomento mi porterebbe a concludere in senso completamente opposto. Mi propongo di dar ragione di questo enunciato che può parere un paradosso: per questo mi riferisco naturalmente alle sovratensioni di origine esterna per le quali essenzialmente sono apprestati gli apparecchi di protezione, non essendo possibile in generale portar difesa dall'esterno contro le sovratensioni di origine interna, mentre se ne può impedire la formazione con opportuni accorgimenti nella costruzione delle macchine e nella condotta degli impianti.

Limitiamoci dunque alle scariche che colpiscono le linee, e consideriamo prima le scariche ad altissima frequenza: gli effetti sono molto diversi a seconda che il punto d'origine è lontano o molto vicino alle stazioni che contengono i macchinari e relative protezioni. Nel primo caso — caso più frequente per i grandi ed estesi impianti — succede molte volte che l'onda provocata arriva quasi completamente smorzata, o che non vi arriva affatto. Sono noti, anche per relazioni pubblicate sulle Riviste Tecniche, casi caratteristici di violenti scariche atmo-

Digitized by Google

sferiche che hanno distrutto tratti di linee, spaccando gli isolatori e talora bruciando le palificazioni in legno, le quali non vennero nemmeno avvertite in centrale, nè per danni ai macchinari nè quanto meno per aver eccitato gli apparecchi di protezione.

Il fatto si spiega ricordando che le scariche di altissima frequenza dànno origine ad onde di grande ampiezza ma di breve passo, le quali hanno un coefficente di attenuazione elevato. Il fenomeno resta di conseguenza limitato nello spazio e quindi, per quanto violento, non riesce talora a interessare le stazioni un po' distanti. Quanto alle linee, gli isolatori attualmente impiegati dànno ormai sufficiente garanzia di resistere anche a queste sollecitazioni anormali: del resto il fenomeno si sviluppa indipendentemente dagli apparecchi di protezione dei quali ci occupiamo.

Quando invece l'onda di altissima frequenza è provocata da una scarica in vicinanza delle stazioni, il pericolo è assai più grave: tuttavia il fatto stesso della grande ampiezza delle onde e del breve passo fa sì che con probabilità uno dei ventri capita in corrispondenza degli apparecchi di protezione e per essi trova sfogo a terra: la probabilità è maggiore quando gli scaricatori sono parecchi, o almeno parecchie le derivazioni dalla linea ad uno di questi; per un determinato impianto quanto più breve è l'onda. Alle maggiori frequenze corrispondono le maggiori probabilità che gli scaricatori entrino in funzione, anche se per sè stessi non molto sensibili, e anche se regolati in modo un po' grossolano. A queste circostanze estreme corrispondono però anche i casi più curiosi di deviazioni delle scariche dai conduttori di terra per raggiungere muri o travi a notevoli distanze.

Per contro le scariche di media frequenza provocano onde di lungo passo aventi un coefficiente di smorzamento piccolo, così che, date le costanti ordinarie delle linee, possono arrivare nelle stazioni anche se provocate a notevole distanza da queste.

Si può bensì osservare, che gli isolanti impiegati nei moderni impianti ad alta e altissima tensione sono tali da resistere alle sollecitazioni di queste onde depresse, ma l'osservazione vale solo in parte, e precisamente per quanto si riferisce alle linee, che realmente non risultano mai danneggiate da scariche di questa natura e forma: non vale più se consideriamo

Digitized by Google

i punti di passaggio dalle linee aeree ai cavi, o da quelle alle macchine, perchè, variando bruscamente i valori delle capacità e delle selfinduzioni e i loro rapporti di grandezza, le onde vengono deformate raccorciandosi in generale ed elevandosi in ampiezza in conseguenza anche di riflessioni parziali o totali.

Per questa ragione le onde di media frequenza che, considerate in sè stesse, appaiono meno pericolose, nelle condizioni pratiche degli impianti industriali possono assumere forme e caratteri pericolosissimi altrettanto quanto le onde di altissima frequenza, con l'aggravante che assumono questi caratteri dopo entrate nei cavi o nelle macchine, cioè dopo sorpassati gli apparecchi di protezione.

Questa forma di onde è ben nota agli elettricisti delle Centrali. A me è successo molte volte, facendo inchieste su casi di fulminazioni, di sentirle chiamare col nome di scariche silenziose: forse perchè arrivano talora mentre non si notano manifestazioni temporalesche nelle vicinanze, o perchè non dànno luogo a fenomeni notevoli per i sensi, non eccitano gli apparecchi di protezione ordinari, e si manifestano solo per gli effetti nelle macchine fulminate.

Questi fatti valgono a spiegare il mio enunciato che poteva parere un paradosso: le onde di altissima frequenza hanno in sè stesse i caratteri della maggiore pericolosità, ma non sono quelle che provocano i danni più frequenti, sia perchè dànno luogo a fenomeni più localizzati, sia perchè eccitano facilmente gli apparecchi di protezione ordinari: le onde di media frequenza e a lungo passo raggiungono invece facilmente le stazioni anche se provocate a distanza, e sono le più difficili ad arrestarsi per la loro forma depressa fino oltre gli apparecchi di protezione.

Queste considerazioni spiegano anche l'efficacia che una lunga pratica ha confermato in favore dei parafulmini " In Serie „: questi introducono nel circuito principale una discontinuità notevole che vale a modificare la forma delle onde nel modo sopra indicato costituendo un cuscinetto di protezione per le macchine che vengono dopo. L'ing. Campos ha riconosciuto che questo sistema è l'unico che presenti una speciale azione contro le scariche ad altissima frequenza; però è mia convinzione che la sua efficacia risieda specialmente nella sua peculiare azione sulle onde di media frequenza le quali, quando non sieno ac-

Digitized by Google

compagnate da tensioni altissime, non sono affatte sentite dagli ordinari scaricatori.

In ordine alla rapidità delle oscillazioni e alle lunghezze d'onda corrispondenti su un determinato circuito, sarebbe difficile precisare i limiti fra quanto si dice media, alta e altissima frequenza, non essendovi discontinuità nell'infinita gamma di questi fenomeni di sovratensioni: ritengo però per certo che i limiti estremi che interessano la protezione degli impianti elettrici siano assai più ampî di quelli calcolati per approssimazione da chiarissimi studiosi della materia. Nei casi ricordati di fulminazioni a condutture, poichè si trattava di palificazioni in legno, la distanza fra gli appoggi era, come di solito, di 30-40 metri; e poichè i pali colpiti erano talora alternati, altre volte consecutivi, risulta che il semipasso dell'onda doveva essere di quest'ordine di grandezza, se pure non un sottomultiplo. Analogamente, per i fenomeni sopra esposti, il limite inferiore delle frequenze che possono rendersi pericolose può discendere a valori minori di quelli generalmente ammessi, dell'ordine di 10^5.

Avendo accennato in principio all'importante studio dell'ingegnere Campos, e combattuto una sua affermazione, mi corre obbligo di aggiungere che non ritengo per questo infirmata la probabile efficacia del sistema perchè, per quanto l'Autore affermi di preoccuparsi essenzialmente delle altissime frequenze, vedo poi dalle tabelle che esso ha comunicato che i suoi dispositivi sono già sensibili, per quanto meno, anche alle frequenze medie: quindi tutt'al più sarà questione quantitativa, cioè di dare ai dispositivi un maggior sviluppo.

Io credo anzi, come ebbi ad accennare già in altra occasione (1), che il sistema Campos potrà avere il maggior successo quando anche non ottenesse un'efficacia superiore a quella di altri sistemi conosciuti, perchè il fatto di poter far a meno di terre costituisce da solo un vantaggio notevolissimo specialmente per certi impianti e per certe località. Quanti si occupano da vicino della protezione degli impianti elettrici sanno infatti quali difficoltà e quanta incertezza presentino spesso le terre e la regolazione delle resistenze relative.

---

(1) Atti A. E. I., vol. XV, fasc. 5°.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

M. l'Ing. GOLA *remarque qu'en général on se préoccupe beaucoup des décharges de haute fréquence et assez peu de celles moins rapides, à tel point qu'on envisage de se passer de toute protection contre les ondes de fréquence moyenne.*

L'Auteur se propose d'expliquer son opinion toute contraire. Dans ce but il relève que les ondes de haute fréquence, par suite de leur faible longueur et du coëfficient d'amortissement élevé, donnent lieu à des phénomènes importants, mais locaux qui, parfois, n'arrivent pas même aux postes des machines, et qui dans d'autres cas font vraisemblablement fonctionner les appareils de protection. Par contre, les ondes à fréquence moindre et de plus grande longueur arrivent dans les stations, si même elles ont pris naissance à des grandes distances; leur forme déprimée n'offre guère de chance d'amorcer les déchargeurs ordinaires, et elles gagnent, par suite, facilement les machines ou les câbles.

L'Auteur remarque à ce propos que la forme des ondes n'est pas constante, mais, au contraire, est fonction de la capacité et de la selfinductance de chaque partie du réseau: il y a donc à prévoir des variations notables avec changement brusque de la valeur de ces quantités. C'est ce qui arrive précisement au point de passage des lignes aériennes aux câbles ou aux machines. Par suite de réflexions totales ou partielles, les ventres des ondes sont renforcés, et elles se propagent depuis ce point à une allure comparable à celle des ondes très rapides, et, puisque tout appareil de protection est franchi, elles deviennent même les plus dangereuses.

M. l'Ing. Gola croit que nulle protection n'est efficace contre les ondes de fréquence moyenne, lorsqu'elles ne sont pas à haute tension, et qu'il faut provoquer le phénomène envisagé plus haut dans un appareil tampon placé avant les machines ou les câbles: ce sont les parafoudres en série.

Digitized by Google

Puisqu'un des Rapporteurs du Congrès cita ce système de protection comme le seul ayant vraisemblablement une action particulière contre les ondes de haute fréquence, l'Auteur tient à déclarer, à la suite d'une très longue expérience pratique industrielle, qu'il croit que l'efficacité de son système des parafoudres en série est due surtout à leur rôle vis-à-vis des décharges de fréquence moyenne.

DISCUSSION

M. G. CAMPOS (Milan). — *Tout en s'occupant spécialement des décharges à haute fréquence et des moyens de protection à adopter à leur égard, n'entend nullement nier l'importance des effets dangéreux des fréquences moyennes. Il a, au contraire, énuméré parmi les plus dangereux ceux qui sont dus à des fréquences relativement basses (ce sont ses propres paroles) en union avec des tensions élevées, particulièrement quand il y a soit réflexion, soit production simultanée d'ondes stationnaires, et il a observé que les installations à haute tension sont naturellement et spécialement préservées de dangers de cette nature. Seules les installations à* très hautes tensions, *a-t-il dit, et il le maintient,* peuvent peut-être se risquer *à limiter ou à abolir les moyens de protection en considération des inconvénients que les meilleurs entraînent. Ceci n'emplique nullement une négligence de sa part des perturbations de moyenne fréquence que l'Ing. Gola semble distinguer dans les vues de l'auteur de la Communication. D'ailleurs il insiste à croire singulièrement dangereuse l'influence des hautes fréquences (dont tant d'observations pratiques ont révélé l'existence et les effets) et spécialement sur les enroulements inductifs, comme par exemple les transformateurs. Il estime, en outre, que cette influence des hautes fréquences est tout aussi pernicieuse sur les installations à haute et à très haute tension que sur les installations à tension modérée.*

Il a étudié un système dans lequel l'absence d'intervalles explosifs pût permettre même le fonctionnement sous tensions limitées, par-

Digitized by Google

ticulièrement dangereusesavec les fréquences élevées, et dans lequel encore l'absence de voies directes à la terre empêchât le courant de ligne de suivre les décharges des surtensions; ces deux points qu'il a spécialement considérés sont généralement moins heureusement atteints que d'autres par les divers systèmes imaginés pour combattre ou prévenir des effets différents. On ne saurait proscrire l'emploi simultané de semblables dispositifs; on doit même parfois le conseiller; mais, vu que les moyens appropriés aux fréquences élevées valent pour les variations brusques et pour les composantes, plus dangereuses encore, résultant des oscillations de moindre fréquence, l'A. est persuadé que, même dans le cas de ces dernières on obtiendra, avec le système décrit, le bénéfice, point négligeable, suivant l'avis même de l'Ing. Gola, d'une extinction et d'une dissipation graduelles.

Digitized by Google

SU ALCUNI METODI DI PREVENZIONE DELLE SOVRATENSIONI INTERNE

Ing. ALBERTO DINA

Regia Scuola Ingegneri (Palermo)

Le sovratensioni si combattono in generale solo quando si sono già manifestate; inquantochè, ad es., esse vengono riflesse, fanno funzionare scaricatori, consumano la loro energia in resistenze.

Un metodo più razionale però sarebbe quello di soffocarle in germe, cioè di impedire che esse si manifestino. Ma, poichè per prevenire un effetto occorre agire sulla causa, a simili metodi si può pensare soltanto per le sovratensioni interne, cioè (prescindendo dai casi di risonanza con un'armonica della f. e. m. impressa) per quella classe di sovratensioni, che hanno origine nell'impianto in seguito a brusche modificazioni nel suo stato.

Ciò posto, il metodo più razionale per prevenire tali sovratensioni sarebbe quello di sostituire, quando ciò fosse possibile, alla modificazione brusca una modificazione graduale. Questo concetto è stato applicato per la messa sotto tensione dei cavi sotto varie forme, fra cui ci basti citare quella assai nota proposta da COWAN, basata sull'uso di un trasformatore ausiliare ad induzione variabile, che permette di portare il cavo dalla tensione zero alla tensione di regime, o viceversa, con variazione rigorosamente continua.

Tuttavia la complicazione che questo apparecchio introduce (e lo stesso dicasi di analoghi dispositivi) non è forse proporzionata al vantaggio. Esso difatti, servendo soltanto all'inser-

Digitized by Google

zione o alla disinserzione del cavo a vuoto, evita sovratensioni che, aggiungendosi alla tensione normale, ne possono al massimo raddoppiare momentaneamente il valore; mentre è senza azione rispetto alle sollecitazioni ben maggiori a cui può venir sottoposto l'impianto, ad es., all'interruzione di un corto circuito.

Se è vero che anche sovratensioni relativamente basse, ripetute sovente, possono a lungo andare indebolire l'isolante, non è tuttavia necessario il loro assoluto annullamento. Praticamente più utile può riuscire una sufficiente limitazione preventiva della loro ampiezza e durata, purchè unita alla semplicità, all'economia e ad una maggiore generalità d'azione dell'apparecchio.

Appunto a questi concetti si informa il metodo seguente.

***

Pei cavi, che sono sottratti alle influenze atmosferiche, si adoperano, per combattere le sovratensioni interne, scaricatori inseriti fra le fasi, costituiti solitamente da ordinari parafulmini ad intervallo d'aria, in serie con una resistenza di smorzamento. Orbene, queste resistenze già esistenti nell'impianto, se opportunamente dimensionate, possono con facilità venire adoperate a prevenire, almeno parzialmente, le sovratensioni che provengono da manovre all'interruttore principale.

Il modo di applicazione di questo principio risulta dalla fig. 1, che per semplicità è stata disegnata con riferimento ad un impianto monofase.

I due contatti A, A sono gli ordinari contatti dell'interruttore, mentre B è un contatto ausiliare, meccanicamente accoppiato ai primi ed elettricamente in parallelo allo scaricatore.

Come indica schematicamente la figura, nella manovra di inserzione viene innanzi tutto connessa la resistenza *in parallelo* al cavo, poi il loro complesso alla sorgente, e per ultimo viene disinserita la resistenza, che resta allora connessa allo scaricatore. Pel nostro scopo l'intervallo di tempo, durante il quale la resistenza rimane in circuito insieme al cavo, può essere assai breve; ad ogni modo esso può venire regolato variando in B la durata del contatto.

Digitized by Google

In modo analogo procede la manovra di disinserzione: viene effettuato dapprima il parallelo della resistenza al cavo, e poi il loro gruppo viene distaccato dalla sorgente.

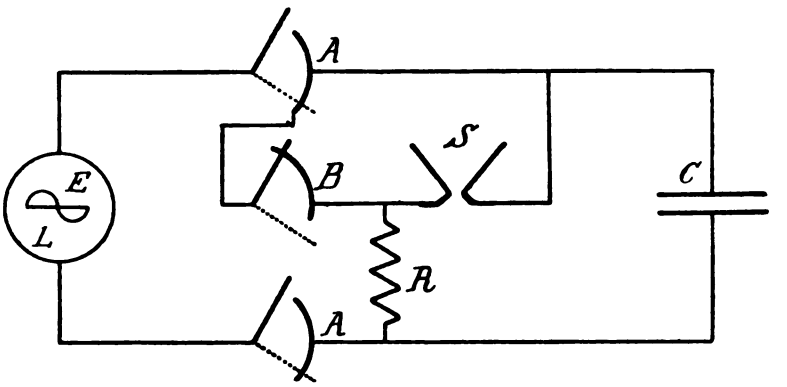


Fig. 1.

In complesso, il contatto B inserisce la resistenza allo stesso modo del parafulmine una volta che questo sia adescato, però colla differenza essenziale che l'adescamento di questo è dovuto a sovratensioni che si sono già manifestate, ed hanno quindi sollecitato l'isolante, mentre l'inserzione preventiva della resistenza ha lo scopo di impedire che esse si manifestino.

La determinazione matematica del valore più opportuno per la resistenza ausiliare (che ho già indicata altrove) riesce molto laboriosa, e sarebbe qui fuori di luogo. Ma, per meglio comprendere il funzionamento del dispositivo, vale la pena di accennarne i concetti fondamentali.

Se per semplicità consideriamo il cavo come una capacità C concentrata, e trascuriamo l'influenza della sua autoinduzione, come pure quella della resistenza sia del cavo che del generatore, al momento dell'inserzione l'interruttore A chiude un circuito formato dall'autoinduzione L della sorgente in serie col gruppo, costituito dalla capacità C e dalla resistenza R in parallelo fra loro. In queste condizioni, il calcolo dimostra che, quando si voglia evitare che alla tensione normale si abbia a sovrapporre un treno di oscillazioni, il valore di R non deve superare quello di una certa resistenza critica:

$$R_0 = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Digitized by Google

Non si deve credere perciò che la R possa venir fatta piccola a piacere. La scintilla d'apertura al distacco della resistenza, nella seconda parte della manovra, può dar luogo a sovratensioni oscillatorie nel circuito di Thomson formato da R, C e dall'autoinduzione λ del cavo (precedentemente trascurata e non segnata in figura) quando non sia verificata la disuguaglianza:

$$R > 2\sqrt{\frac{\lambda}{C}}.$$

Se si può ritenere che, data la grandezza relativa di L e di λ, il valore massimo di R compatibile colla prima condizione, cioè la resistenza critica R_0, soddisfi in generale anche a questa seconda condizione, è tuttavia possibile per altre ragioni che il suo distacco dia luogo a sovratensioni.

Difatti le curve della tensione, a cui è sottoposto il cavo a resistenza inserita o disinserita, differiscono fra loro per ampiezza e per fase; se supponiamo che il distacco della resistenza (ammesso istantaneo) avvenga in un momento al quale corrisponde nella prima curva l'ordinata e_1 e nella seconda l'ordinata e_2, ha luogo una brusca variazione nella tensione di carica da e_1 ad e_2, che può generare oscillazioni di ampiezza $e_1 - e_2$; ed il calcolo dimostra che la tensione risultante può, in condizioni sfavorevoli, riuscire anche per $R = R_0$, se non di molto, tuttavia superiore alla tensione di regime. Questo pericolo diminuisce rapidamente coll'aumentare di R.

Queste considerazioni, unite all'altra che il costo della resistenza (che, dovendo essere di valore prestabilito, si farà opportunamente metallica nell'olio) diminuisce coll'aumentare del suo valore, fanno nascere spontanea la domanda: È possibile scegliere per la resistenza R un valore superiore ad R_0, pur ottenendo una sufficiente limitazione preventiva delle sovratensioni?

Per avere un'idea sommaria del fenomeno in modo facile si sono disegnate le curve della fig. 2 nell'ipotesi semplificatrice che la forza elettromotrice della sorgente non sia alternativa, sibbene continua. Esse indicano il valore percentuale, rispetto alla tensione di regime, del primo e del secondo massimo della sovratensione oscillatoria, in funzione del rapporto $\frac{R}{R_0}$ della resistenza scelta alla critica, e mostrano ad esempio che, per una

Digitized by Google

resistenza doppia di R_0, il primo massimo è solo circa il 15 % della tensione normale, mentre il secondo è già del tutto trascurabile. Persino per una resistenza quintupla della critica, il primo massimo non raggiunge circa che il 50 %, ed il secondo

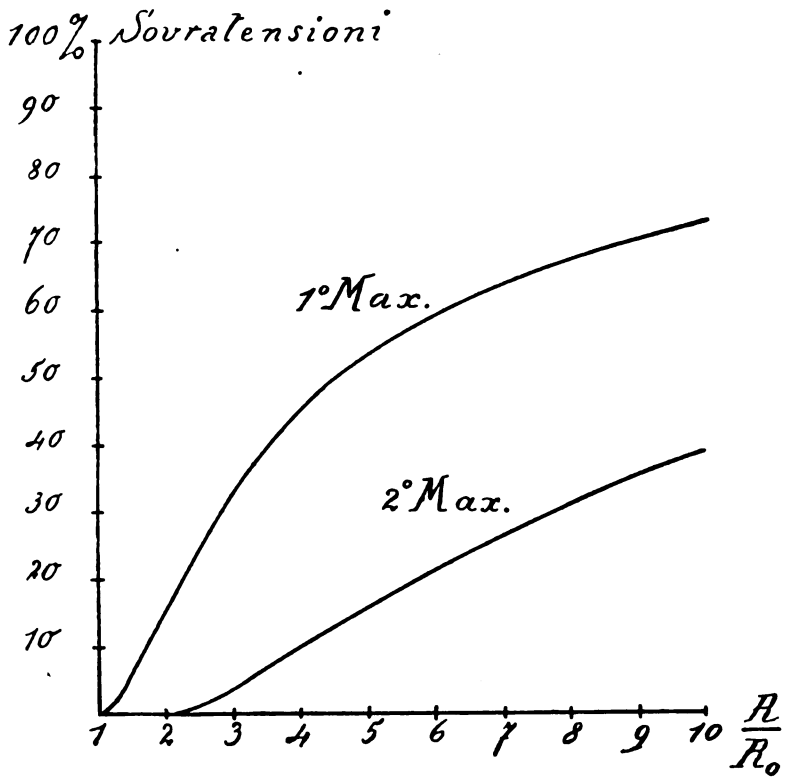


Fig. 2.

il 15 % della tensione normale; mentre, inserendo il cavo senza resistenza ausiliare, nella stessa ipotesi posta a base di questa ricerca, che macchina e cavo siano esenti da perdite di energia, si otterrebbe un treno di oscillazioni non ammortite, la cui ampiezza (costante per tutte) raggiunge il 100 % della tensione di regime.

Questi risultati (che nelle linee generali valgono anche per una forza elettromotrice alternativa) sono molto importanti per l'applicazione pratica del metodo, mostrando che esso gode di una notevole elasticità. Essi ci dicono difatti che, nella determinazione della resistenza, si potrà senza scrupolo basarsi su valori

Digitized by Google

approssimati di L e di C, scegliendo opportunamente (avuto riguardo alla seconda fase della manovra ed al costo) un valore superiore a quello critico $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$.

Anzi, a tenore degli stessi risultati, si può tener conto facilmente di possibili variazioni nelle condizioni dell'impianto (ad es., se, invece di una macchina, ne marciassero due o più in parallelo), perchè una resistenza, determinata con riferimento ad un dato valore di $\frac{L}{C}$, può riuscire di notevole vantaggio anche quando questo rapporto risultasse sensibilmente inferiore al supposto, tanto più che la resistenza critica varia soltanto colla radice quadrata di $\frac{L}{C}$.

Per la disinserzione del cavo a vuoto valgono considerazioni analoghe alle precedenti. Ma anche al distacco del cavo in altre condizioni, ad es., in seguito ad un corto circuito, la interruzione avviene quando cavo e resistenza sono in parallelo fra loro, cioè in un circuito il cui rilevante smorzamento limita energicamente l'ampiezza delle sovratensioni che si possono manifestare.

Oltre alle sovratensioni accennate, ve ne sono altre che la resistenza non riesce a prevenire, nemmeno parzialmente, perchè non dipendono da una manovra di inserzione o disinserzione, essendo, ad es., dovute a brusche variazioni di carico, però non così forti da produrre lo scatto dell'interruttore. Queste vengono combattute dallo scaricatore, il cui funzionamento ha l'effetto di consumare la loro energia nella stessa resistenza R.

Il dispositivo descritto, riducendo a pochi i casi in cui si manifestano sovratensioni, e viene quindi adescato lo scaricatore, permette di aumentare la sensibilità di quest'ultimo, senza che si abbiano a temere scariche troppo frequenti. Anche riguardo al funzionamento dello scaricatore, è raccomandabile un valore di R *relativamente* elevato, affinchè non vengano provocate variazioni di tensione così sentite da disturbare l'esercizio.

Il metodo può pure servire nella stazione d'arrivo a prevenire le sovratensioni dovute alla chiusura o all'apertura del circuito formato dall'autoinduzione di un trasformatore e dalla capacità del cavo. Esso inoltre è applicabile, a salvaguardia delle macchine e dei trasformatori, anche in impianti a linea aerea, purchè questa sia munita di scaricatori fra le fasi, e si tenga conto della sua autoinduzione nel calcolo della resistenza.

Digitized by Google

⁂

Alcune Case tedesche hanno introdotto negli ultimi anni, per importanti impianti ad alta tensione, interruttori muniti di *speciali* resistenze, che effettuano le manovre di inserzione e disinserzione in due tempi, ad es. la messa sotto tensione di un cavo, connettendolo dapprima alla sorgente *in serie* alle resistenze e chiudendo poi queste in corto circuito, come indica schematicamente la fig. 3.

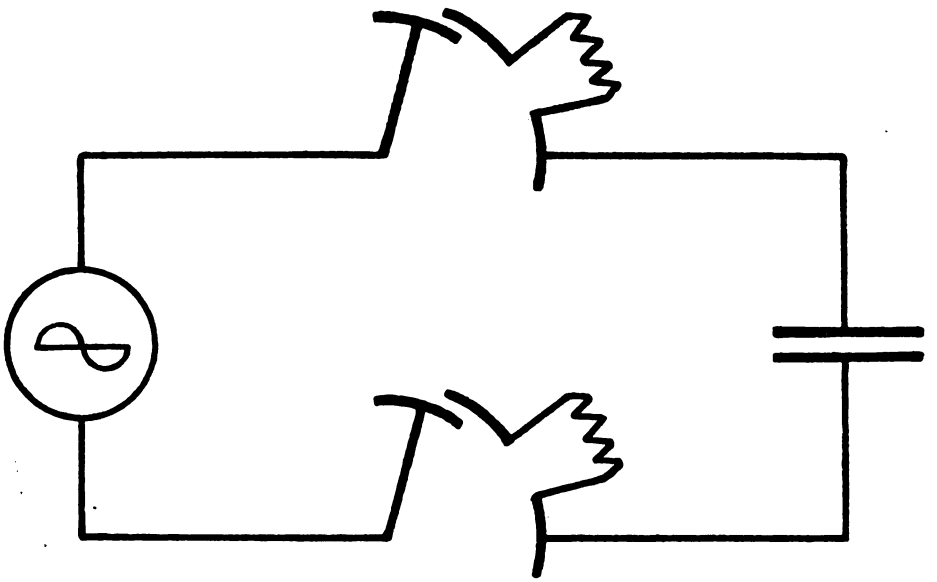


Fig. 3.

Anche con questo dispositivo sarebbero preferibili nelle due fasi della manovra resistenze di grandezza diversa. Infatti, una resistenza elevata è atta a prevenire le sovratensioni nella prima fase, ma può dar loro adito nella seconda, perchè la sua disinserzione provoca una variazione notevole nella tensione applicata al cavo. Una resistenza piccola invece, mentre è favorevole per la seconda parte della manovra, risulta di poco effetto nella prima. Senza entrare in maggiori particolari si intuisce la possibilità di scegliere una resistenza, che soddisfi parzialmente ai diversi requisiti, dando luogo nelle due fasi soltanto a leggere sovratensioni.

Digitized by Google

Simili interruttori di protezione, con resistenze opportunamente calcolate, si possono adoperare anche per linee aeree, e nelle stazioni ricevitrici per trasformatori importanti.

È chiaro il vantaggio che un tale dispositivo porta all'interruzione di un corto circuito, inquantochè la corrente viene dapprima ridotta di valore, e la corrente residua staccata in un circuito a forte smorzamento.

In impianti di grande potenza la corrente di corto circuito può raggiungere però valori così elevati, che anche la sua interruzione in due tempi riesca di poca efficacia. In tali casi, allo scatto dell'interruttore di protezione, si può far precedere l'inserzione automatica di resistenza nel circuito di eccitazione. La grande autoinduzione di quest'ultimo rallenta l'azione della resistenza nel diminuire l'eccitazione, e quindi la corrente di corto circuito; sicchè il risultato è analogo a quello che produrrebbe l'inserzione *graduale* di resistenza nel circuito principale.

RÉSUMÉ

L'emploi de moyens de prévention des surtensions présente l'avantage d'empêcher tout effort nuisible sur l'isolement, en étouffant les surtensions, pour ainsi dire, avant leur naissance, tandis que les systèmes de protection, n'entrant en fonctionnement qu'avec un certain retard, laissent l'installation sans défense contre les surtensions pendant un délai de temps très court, mais suffisant pour la mise en danger des isolants.

Pour prévenir totalement ou partiellement des surtensions, il faut modifier le phénomène qui en est la cause; par suite on ne pourra appliquer une méthode de cette nature que dans le cas des surtensions intérieures, c'est-à-dire provoquées par des changements brusques dans l'état de l'installation.

L'A. décrit une méthode de prévention partielle, laquelle, tout en n'anéantissant pas complètement les surtensions dues à des manœuvres aux interrupteurs, fait qu'elles se manifestent seulement avec une grandeur et une durée considérablement réduites. Cette méthode repose sur l'emploi

Digitized by Google

des résistances en série avec les parafoudres branchés entre fils, dispositif de protection qu'on rencontre dans la plupart des installations et surtout dans celles avec câbles. P. e., la méthode s'applique comme suit à la mise sous tension d'un câble monophasé:

L'interrupteur doit être construit avec les deux contacts ordinaires et un troisième contact auxiliaire, qui, étant électriquement en parallèle avec le parafoudre, court-circuit par sa fermeture ce dernier et relie directement la resistance aux conducteurs. Les trois contacts sont couplés mécaniquement d'une façon telle que l'on peut obtenir dans l'insertion du câble trois phases successives: 1) mise en parallèle de la résistance et du câble; 2) connexion de ce groupe à la source; 3) mise hors du circuit de la résistance, qui reste alors reliée au parafoudre.

L'A. démontre qu'il suffit de donner à la résistance une valeur comprise entre certaines limites assez éloignées, pour n'obtenir dans les phases 2 *et* 3 *de la manœuvre que des surtensions presque négligeables.*

Lorsque on met le câble à vide hors circuit, on obtient des résultats analogues; mais aussi la coupure du court-circuit vient s'effectuer lorsque le câble est directement en parallèle avec la résistance, c'est-à-dire dans des conditions qui s'opposent à la formation de surtensions importantes.

L'A. discute enfin les méthodes suivantes de prévention partielle, introduites par quelques Sociétés de construction:

1) emploi d' " *interrupteurs de protection* „ *pourvus de résistances* spéciales, *lesquelles dans une prémière phase de la mise sous tension sont* en série *avec le câble et sont ensuite court-circuitées;*

2) introduction automatique d'une résistance dans le circuit d'excitation, laquelle précède le déclanchement du disjoncteur simple ou de protection.

DISCUSSION

M. le Président A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.) *remercie M. le Prof. Dina de son intéressante Communication, et, rappelant le dispositif (cité par l'Auteur) déjà proposé dans le même but, lequel nécessite également des résistances d'extinction, il indique les différences et les avantages que présente sur celui-là le dispositif appliqué par M. le Prof. Dina.*

Digitized by Google

SISTEMA DI PROTEZIONE DEGLI IMPIANTI

dalle sovratensioni

SCARICATORI "SIG"

(Brevetti Ingg. Pizzuti e Ferrari)

Ing. MICHELE PIZZUTI (Napoli)

Mi sembra opportuno esporvi succintamente il sistema di protezione da me studiato assieme all'Ing. Ferrari. Benchè tale sistema sia stato già esposto in diverse comunicazioni, riportate negli atti dell'A. E. I., desidero mostrarvi altre proprietà del sistema stesso, il quale ha ottenuto un vero successo nella pratica. Non trattasi di un nuovo tipo di scaricatore, ma di un apparecchio, il quale, inserito in un circuito, localizza le onde di sovratensione in modo da produrre dei ventri di oscillazione in punti ben determinati, nei quali devono installarsi gli scaricatori del tipo adatto.

Dopo quanto è stato riferito e discusso in questo Congresso, non vi parlo dell'origine delle sovratensioni. Sappiamo che negli impianti possono manifestarsi delle sovratensioni pericolose, per induzione di scariche atmosferiche o per bruschi turbamenti nello stato normale di esercizio, causati da fusione di valvole o scatto di automatici, da manovre sbagliate o guasti, ecc.

È dimostrato, che tutti gli innanzi detti fenomeni determinano, negli impianti, delle correnti oscillanti a tensione, che può essere anche altissima ed a frequenze sempre molto elevate, rispetto a quelle di esercizio degli impianti.

Negli atti dell'A. E. I., volume XIV, fascicolo 4° e 5°, ho studiato il modo di comportarsi delle innanzi dette onde di sovra-

Digitized by Google

tensione nei circuiti elettrici. Da tale studio, confortato anche dalle pratiche esperienze, risulta:

1° Che un onda oscillante perturbatrice si propaga nel circuito con una velocità $\sqrt{\frac{1}{CL}}$, ove C ed L sono la capacità e la induttanza unitarie del conduttore.

2° Che nella propagazione delle onde oscillanti, in un circuito, se $\sqrt{\frac{L}{C}}$ (rapporto chiamato dallo Steinmetz impedenza naturale del circuito) (1) è costante, l'onda si propaga senza notevole alterazione o deformazione.

3° Quando un'onda arriva in un punto del circuito, a partire dal quale l'impedenza naturale del circuito diminuisce, si verifica, in tale punto, una riflessione parziale, con cambiamento di segno nell'onda dei potenziali, e, per conseguenza, un abbassamento del potenziale stesso. Se, al contrario, l'onda arriva in un punto del circuito a partire dal quale l'impedenza naturale aumenta, si verifica, in tale punto, una riflessione parziale senza cambiamento di segno, e, per conseguenza, una sovra elevazione del potenziale. L'inverso avviene per l'intensità.

4° Le sovraelevazioni o gli abbassamenti del potenziale sono tanto più notevoli quanto maggiore è la variazione nell'impedenza naturale (2).

5° Se l'impedenza naturale da un valore piccolissimo passa ad altro grandissimo, in due tratti successivi del circuito, nel punto di unione di essi si ha una riflessione totale dell'onda, senza cambiamento di segno pel potenziale e con cambiamento di segno per l'intensità e, quindi, in quel punto si forma un ventre di oscillazione pel potenziale ed un nodo per l'intensità. L'inverso accade in quei punti del circuito nei quali l'impedenza naturale, da un valore altissimo, passa ad uno bassissimo.

L'apparecchio "Sig„, come dalla figura 1, risulta formato da una capacità A B, che ha una delle faccie in comunicazione colla terra e l'altra in serie tra la conduttura e la induttanza B C, che, a sua volta, è inserita in serie col conduttore, che va all'impianto da proteggere.

---

(1) "The Nature of Transients in Electrical Engineering (Congresso di Torino, 10-17 settembre 1911).

(2) Questo risultato viene confermato dallo studio innanzi citato, presentato, in questo Congresso, dallo Steinmetz.

Digitized by Google

Si vengono così ad inserire nel circuito: un tratto A B, che ha una impedenza naturale piccolissima, ed un tratto B C, che ha una impedenza naturale grandissima. Dopo quanto ho innanzi detto, un'onda perturbatrice, che arriva dalla linea, nel punto A dell'apparecchio si riflette parzialmente con una diminuzione del potenziale, ed indi, in B, si riflette totalmente. Nel punto B il potenziale assume un valore notevolmente maggiore di quello raggiunto sulla linea, perchè fra i tratti A B e B C la variazione dell'impedenza naturale è maggiore di quella tra la linea ed il tratto A B.

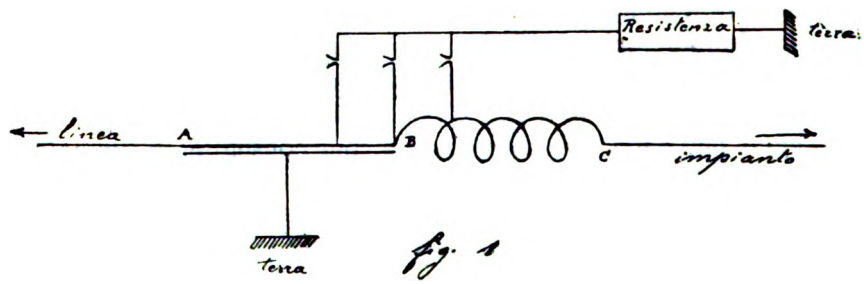


fig. 1

Ponendo nel punto B uno scaricatore, la protezione dell'impianto, dopo il punto C, è raggiunta, perchè prima che l'onda perturbatrice sia pervenuta all'impianto da proteggere viene scaricata nel punto B ed attraverso il dielettrico della capacità A B (1). Si sono aggiunti altri scaricatori in altri punti dell'apparecchio, come è indicato nella figura, perchè, come si è osservato in pratica, durante l'imperversare di violenti temporali, possono funzionare contemporaneamente diversi scaricatori per ismaltire la notevole energia immessa nella linea.

L'apparecchio, come è studiato, presenta il grande vantaggio di poter essere installato negli impianti, per proteggerli dalle sovratensioni, che pervengono da entrambi i lati del circuito (così, ad esempio, per garantire le linee lungo il loro percorso, o per impedire, che le sovratensioni provocate da scatti di automatici, od altro, abbiano a propagarsi alla restante parte dell'impianto). Lo schema delle connessioni, in tal caso, è rappresentato dalla figura 2.

Qualsiasi sovratensione proveniente da A viene scaricata in

(1) L'induttanza B C è calcolata in modo, che su di essa resti abbracciata circa $^1/_4$ della lunghezza d'onda.

Digitized by Google

B, e qualsiasi sovratensione proveniente da D viene scaricata in C.

Proporzionando opportunamente le capacità e le induttanze l'apparecchio raggiunge anche la protezione dei cavi sotterranei per sovratensioni provocate da risonanze o comunicate per collegamenti a linee aeree.

Per non intrattenervi ulteriormente vi prego di rilevare dagli atti dell'A. E. I., innanzi detti, la descrizione costruttiva degli apparecchi; essa non presenta, d'altra parte, interesse notevole.

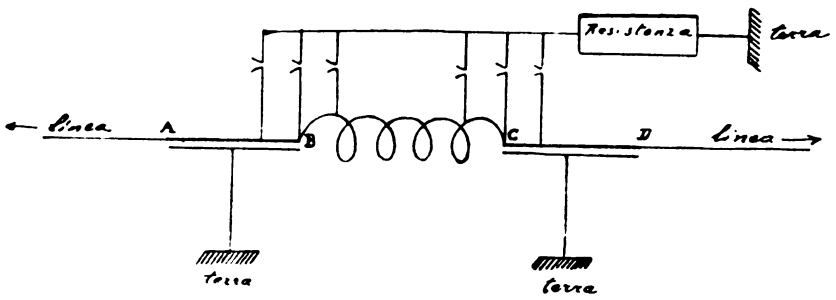


fig. 2

La costruzione degli apparecchi è stata fatta fin'ora, dalla Società Generale per la Illuminazione di Napoli; ma adesso è stata assunta, per l'Italia, dal Laboratorio Elettrotecnico Ingegnere Luigi Magrini di Bergamo. Prego i Sigg. Congressisti di esaminare l'apparecchio, che è installato nella cabina modello, che la stessa Ditta ha montata in questa Esposizione.

Apparecchi del tipo descritto con scaricatori ad alette sono stati installati, con pieno e completo successo, nei seguenti impianti: Società Meridionale di Elettricità di Napoli — Società Generale per la Illuminazione di Napoli — Società Napoletana per imprese elettriche — Società Elettrica della Campania — Società per Applicazioni di Energia Elettrica di Torre Annunziata — Trasporto Idroelettrico del Lete — Società delle Strade Ferrate Secondarie Meridionali — Ferrovia e Funicolare del Vesuvio, ecc.

Avendo ancora un certo numero di apparecchi disponibili, costruiti dalla Società Generale per la Illuminazione di Napoli, per tensioni da 10.000 a 50.000 Volt, sono autorizzato a metterli a disposizione di quei colleghi, che intendessero fare delle prove, con tutte le istruzioni del caso.

Mi sia concesso, infine, esprimervi il mio parere sul problema.

Digitized by Google

prima di adesso non risoluto, della protezione degli impianti elettrici da sovratensioni.

Piuttosto che studiare nuovi scaricatori, il cui funzionamento è subordinato alla disposizione e propagazione delle onde perturbatrici, bisogna proporsi i seguenti scopi:

1° Localizzare le onde di sovratensione in modo da scaricarle sicuramente a terra, con gli ordinari scaricatori.

2° Smorzare completamente le dette onde di sovratensione.

Il primo scopo è raggiunto completamente con gli apparecchi descritti. Pel secondo, auguro all'egregio collega Campos il più lieto successo.

RÉSUMÉ

L'auteur rappelle les résultats des études qu'il a faits sur la propagation des ondes oscillantes à fréquence élevée dans les circuits électriques et publiés dans les " Actes de l'A. E. I. „ (tome XIV, bulletin 4 et 5).

Ces études comprennent notamment le comportement des ondes de sur tension par rapport aux variations de $\sqrt{\frac{L}{C}}$ *(impédance naturelle), dans le circuit électrique.*

Les lois trouvées sont les suivantes:

1) Une onde oscillante perturbatrice se propage dans les circuits à la vitesse $\frac{1}{\sqrt{C\,L}}$, *où* C *et* L *sont la capacité et l'inductance linéaires du conducteur.*

2) La propagation des ondes oscillantes dans un circuit, dont $\sqrt{\frac{L}{C}}$ *est constant, se fait sans altération ni déformation notables.*

Digitized by Google

3) Lorsqu'une onde réjoind un point du circuit, à partir duquel l'impédance naturelle du circuit diminue, on y obtient une réflexion partielle avec changement de signe de l'onde des potentiels, et par suite un abaissement du potentiel. Si, au contraire, l'onde réjoind un point du circuit, à partir duquel l'impédance augmente, on y obtient une réflexion partielle sans changement de signe, et, par suite, une augmentation de potentiel. Il se produit l'inverse pour l'intensité.

4) L'élévation ou l'abaissement du potentiel sera d'autant plus important que la variation de l'impédance naturelle sera plus grande.

5) Si l'impédance naturelle passe d'une valeur très faible à une valeur très élevée dans deux parties successives du circuit, au point de réunion de ces deux parties se produit une réflexion totale de l'onde. Le potentiel ne change pas de signe dans cette réflexion, tandis que l'intensité en change.

Par suite on aura en ce point un ventre d'oscillation pour le potentiel et un nœud pour l'intensité. L'inverse a lieu aux points du circuit, où l'impédance naturelle passe d'une valeur très élevée à une valeur très faible.

Sur ces principes l'auteur a construit un appareil qui, mis en série dans le circuit à protéger, produit en des points bien définis des ventres d'oscillations des potentiels des ondes de surtension, et en ces points il installe des déchargeurs quelconques.

L'auteur résoud également l'important problème de la protection quand on veut garentir une installation contre les surtensions qui peuvent se produire des deux côtés du circuit (protection des lignes aériennes le long du parcour, ou surtensions qui peuvent se produire dans l'installation à la suite des déclanchements d'interrupteurs, fusions de fusibles, fausses manœuvres, etc.).

L'auteur parle des installations faites et de leur fonctionnement entièrement satisfaisant. Il invite en outre les Congressistes à examiner l'appareil installé dans la cabine modèle exposée au stand du Laboratorio Elettrotecnico Ing. Luigi Magrini de Bergamo, qui a entrepris la construction de ces appareils pour l'Italie. Il en offre ensuite aux collègues, qui voudraient les essayer, un certain nombre, pour des tensions de 10.000 a 50.000 volts et, dans ce but prie de bien vouloir s'adresser à la Società Generale per l'Illuminazione de Naples.

Digitized by Google

The Rotating Electric-Current Field.

A. E. KENNELLY (Cambridge Mass. U. S. A.).

It is now more than twenty-five years since Professor Galileo Ferraris developed, in this city of Turin, his celebrated discovery of a rotating magnetic field, as embodied in the splitphase rotary-field motor which he showed to his students in 1885, and the theory of which was first published by him in March 1888 (1). That beautiful and simple theory continues unchanged as our fundamental rotating-field theory to this day. This theory of the rotating magnetic field was essentially geometric in character. It gave a great impetus to the technology of alternating-current vectors in general, and to that of rotating vectors in particular. Ferraris added important theorems to the science of plane-vector geometry in 1894 (2).

The rotating-vector theory was developed by Ferraris in particular reference to rotating magnetic flux. As he pointed out, however, it applies equally well to all solenoidal fluxes, such as the fluxes of an incompressible material fluid, electrostatic flux and electric current flow.

The writer has recently had occasion to develop a particular case of Ferraris' rotating-vector theory, in relation to electric current flow in two dimensions; i. e. to polyphase currents in

---

(1) *Rotazioni Elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate.* Atti della R. Accademia delle Scienze di Torino, March 18th, 1888, XXIII, pp. 360-375. " Industries „, 1888, IV, p. 505. " Journal de Physique „, 1889, VIII, p. 608.

(2) *A method for the treatment of rotating or alternating vectors, with an application to alternate current motors.* " The Electrician „, May-June 1894, pp. 110-112, 129-131, 152-153, 184-186. Vol. XXXIII.

Digitized by Google

a conducting sheet (1). A few new quantitative relations bearing upon the rotating-vector theory are here offered as a small tribute to the work and memory of Turin's scientist and pioneer exponent of plane-vector technology.

Construction.

A flat square metallic sheet p, q, r, s, Fig. 1, is mounted on a light wooden supporting frame P, Q, R, S. It is desirable to use

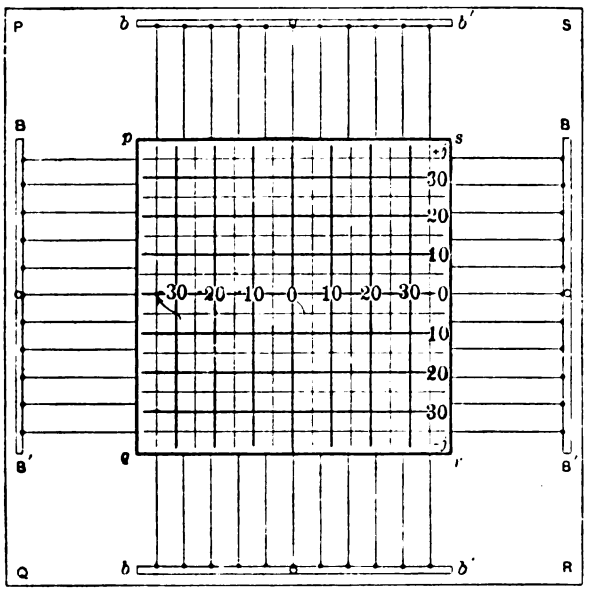


Fig. 1.

a large sheet, as nearly uniform in thickness and composition as possible. A sheet of tinned iron 35 cm. square and 0,46 mm. thick has been used with satisfactory results; but the best results have been obtained with a sheet of commercial zinc 81,5 cm. square and 0,46 mm. thick. In what follows, reference will therefore be made exclusively to the experiments with this zinc sheet.

---

(1) *A New and Direct Process of Producing Alternating-Current Vector Diagrams Experimentally*, by A. E. KENNELLY, H. G. CRANE and J. W. DAVIS. " Electrical World ", March 30th, 1911, pp. 783-787.

Digitized by Google

At uniform intervals along each edge, high-resistivity wires are soldered on to the sheet, as shown in Fig. 1, connecting the edges of the sheet to stout copper straps, or bars, BB′, *bb′*. These four bars should not be soldered directly on to the edges of the sheet, for the evident reason that they would tend to short-circuit the sheet, and prevent the proper formation of a rectilinear network of potential and flow lines, when a steady electric current is allowed to pass across the sheet in one direction. In the apparatus used, there were eleven wires of high-resistivity metal ($\varrho = 45$ microhm-cm.) soldered along each edge symmetrically at $7 =$ cm. intervals. These wires were 29,5 cm. long, between copper bar and sheet solderings. Their diameter was 0,45 mm. The resistance of each was 0,836 ohm; or 0,0283 ohm per linear cm. It is important that these fringes of high-resistivity wires should be as nearly uniform and symmetrical as possible, since otherwise they might create, in another way, the very error they are employed to avoid; that is, they might impress differences of potential on the edge of the sheet, when a steady current flows across it, say from left to right, and so prevent the establishment of a rectilinear potential system. For this reason, the fringe wires should not be too few or too thin. An approximate method for estimating the error in the form of the sheet due to the attachment of the fringes is given in Appendix A.

The frame P, Q, R, S, with the attached sheet and fringes, may conveniently be supported upright on a wall. The surface of the sheet is symmetrically and lightly scratched with a graving tool, into rectangular coordinates, at intervals of one centimeter. In Fig. 1 only every fifth centimeter line is so indicated. With the aid of these lines, the surface is divided into squares of one centimeter, with respect to two perpendicular axes of reference, intersecting, at O, the center of the sheet. One of these axes is called the reference axis, and the other the j-axis or axis of imaginaries.

Rectangular Current Field.

If a continuous current of I amperes is sent across the sheet between the bars BB′, BB′, parallel to the reference axis, and if ϱ is the resistivity of the metal in the sheet (ohm-cm.) ($6{,}6 \times 10^{-6}$),

Digitized by Google

a is the breadth of the square sheet (cm. 81,5);
b is the thickness of the square sheet (cm. 0,046).
Then the resistance R of the sheet between opposite edges is:

$$R = \frac{a}{ab}\varrho = \frac{\varrho}{b} \qquad \text{ohms (1)}$$

In the case considered this resistance was

$$6{,}6 \times 10^{-6} / 0{,}046 = 143 \times 10^{-6} \text{ ohms.}$$

The resistance per linear cm. of the sheet is also:

$$\frac{R}{a} = \frac{\varrho}{ab} \qquad \text{ohms/cm. (2)}$$

or, in the case considered, $143 \times 10^{-6} / 81{,}5 = 1{,}755$ microhms per linear cm. The drop of potential between the edges of the sheet is:

$$E = IR = \frac{I\varrho}{b} \qquad \text{volts (3)}$$

or, for the sheet tested, with $I = 10$ amperes, $E = 1{,}43 \times 10^{-3}$ volt and the linear drop of potential, or electric intensity in the sheet, is:

$$\eta = \frac{E}{a} = \frac{I\varrho}{ab} \qquad \text{volts/cm. (4)}$$

or for the sheet tested, $\eta = 17{,}55$ microvolts per cm. with $I = 10$ amperes.

The systems of current and potential distribution will, of course, be rectangular, if the current across the sheet is steady, the sheet uniform, and the fringe errors negligible. That is, a potentiometer should indicate that all points along the same j-line have the same potential, and that the difference of potential between successive j-lines is in accordance with (1).

(1) *The Electrician*, June 1, 1894, p. 130, vol. XXXIII.

Digitized by Google

Simple Harmonic Current Field.

If instead of sending a continuous current across the sheet along the direction of the reference axis, we send a simple alternating current of amplitude I_m amperes, with a frequency of f cycles per second, then according to the theorem of Ferraris [1], this is equivalent to having two equal currents in the sheet, each of $I_m/2$ amperes, Fig. 2, one Os rotating positively, or counter-clockwise, and the other Od, negatively, or clockwise,

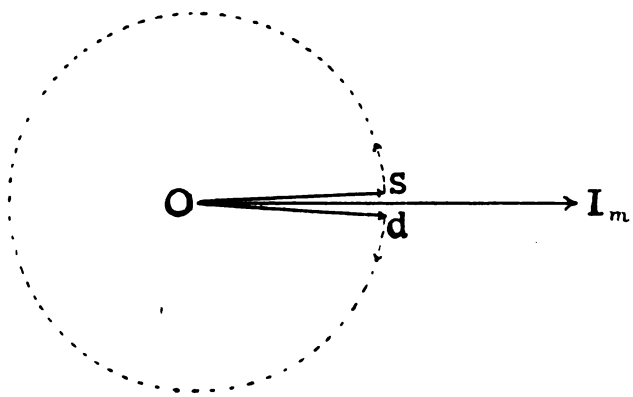


Fig. 2.

at the same angular velocity $\pm \omega = \pm 2\pi f$, radians per second, starting together in opposite directions from the position OI_m. Their resultant at any instant is then the actual single-phase current:

$$i = I_m \cos \omega t \qquad \text{amperes.} \quad (5)$$

Pure Circular Rotating Current Field.

If then a second simple alternating current of the same frequency and strength as the first, but obtained from an electrically independent source (i. e. not cross-connected conductively), and with 90° phase difference, is supplied to the sheet across the j-axis; then, as shown in the Ferraris diagram Fig. 3, there will be a pure rotary-current field set up in the sheet; because,

Digitized by Google

if at the moment when teh current in the reference axis $Oa = I_m \cos \omega t$ starts with its rotary components $o' s'$ and $o' d'$ from the position shown, the current in the j-axis has already passed through a quarter cycle from the time position ob, so that its rotary components have reached the points os and od; then bringing both diagrams to a common center at O, the two sinistrorsal components os $o's'$ are in unison of phase, and combine vectorially into a doubled rotary sinistrorsal component OS: while the two dextrorsal components od, od' are in opposite phases, and their vector sum vanishes. If either of the component single currents ob $o'a$ is reversed, it is easily seen that the direction of rotation vector OS is also reversed. In the case considered, the virtual current strength in each of the two axes of the sheet was from 10 to 15 amperes r. m. s., at different times, corresponding to a maximum cyclic value of $I_m = 14{,}14$ to 21,21 amperes. In round numbers, we can consider the current as having been $I_m = 20$ amperes.

Elliptically Rotating Current Field.

If one of the component quadrature currents, say the current along the reference axis, is greater than the other; then the Ferraris diagram shows that there will be, in the resultant, a simple rotating current, plus a residual alternating current, whose amplitude is the difference in amplitudes of the components. This is equivalent to an elliptically rotating-current field, with its major axis along the stronger or reference direction, and its minor axis along the j-direction. If the two component currents are unequal, and are also not in quadrature, the resultant rotating current field will be, in general, an ellipse, with its axes displaced with reference to the axes of the sheet.

Digitized by Google

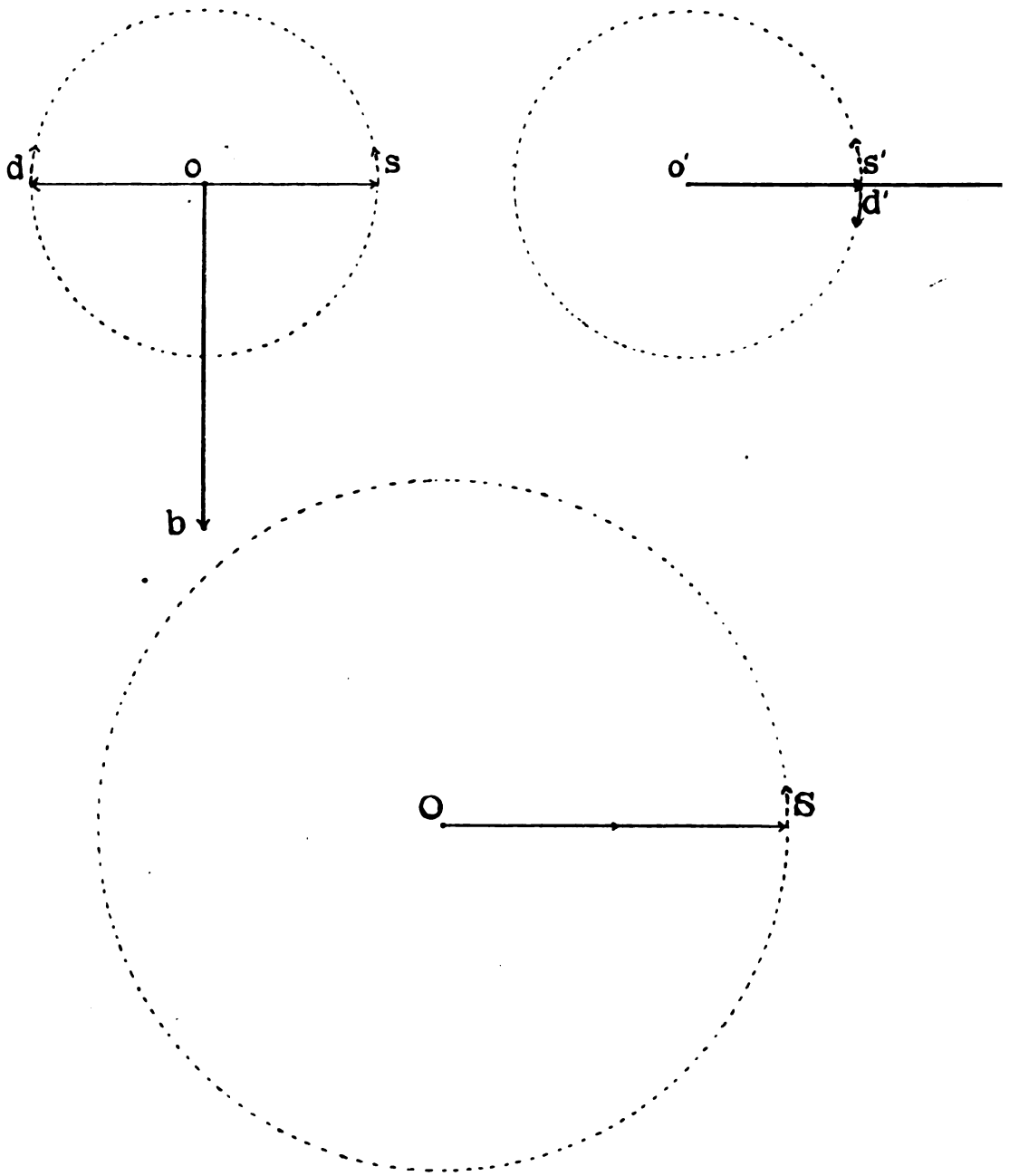


Fig. 3.

Digitized by Google

Electrical Connections for Rotating-Current Field.

The general connections of the sheet are indicated in Fig. 4. MM is the stator armature of a two-phase generator, and F its

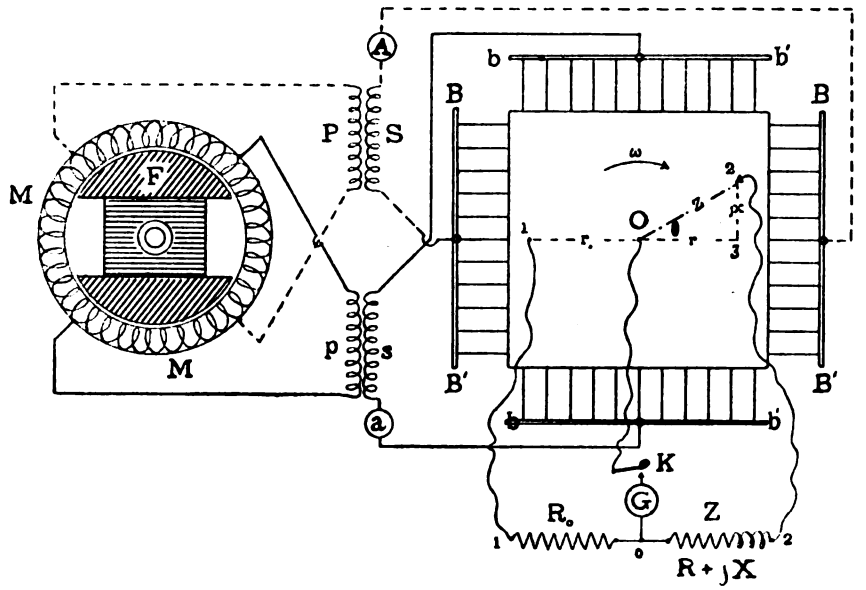


Fig. 4.

rotor field magnet, represented for simplicity as bipolar. The gramme-ring armature, being tapped at quadrants, is connected to the primary windings P, p, of two similar transformers, the secondaries, S, s, of which supply equal quadrature currents to the sheet, through the ammeters A, a. By this means, a rotary current field is established in the sheet, and also a rotary field of electric intensity η. The angular velocity of these fields is ω, the same as that of the bipolar supply rotor F, and the direction of these rotating fields depends upon the relative directions of the two quadrature currents. Reversing switches, one in each supply circuit, not shown in the Figure, enabled the direction of rotation to be reversed at will.

With a rotary current speed of 60 revolutions per second in the sheet, corresponding to an alternating-current frequency of

Digitized by Google

60 cycles per second, it is not easy to demonstrate the existence of the rotating current or electric intensity, by means of the usual alternating-current apparatus. If, however, the speed of the supply rotor F is reduced, so as to give only one or two cycles of current per second, a very small compass needle, supported immediately over the sheet, can be set in rotation, so as to reveal, and keep pace with, the rotating current.

With the aid of a vibration galvanometer, however, the presence of a rotating-current field and its consequent rotating field of electric intensity may be readily demonstrated and examined.

Magnitude of the Rotating Electric Intensity.

We define an electric intensity on the flat surface of an electric conducting sheet as the gradient of electric potential, so that if x is the shortest distance between two points on the sheet, and u the difference of potential between them in volts, at a given instant, then the mean instantaneous value of the electric intensity along x is:

$$\eta_x = \frac{u}{x} \qquad \text{volts/cm.} \quad (6)$$

which is reckoned as positive if the potential rises in the direction along x selected. In general, when the potential gradient is variable from point to point, the electric intensity is a vector quantity in the plane of the conducting surface, and in the direction of x, has the magnitude:

$$\eta_x = \frac{\partial u}{\partial x} \qquad \text{volts/cm.} \quad (7)$$

It has its maximum instantaneous value:

$$\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2} = \frac{\partial u}{\partial s} \qquad \text{volts/cm.} \quad (8)$$

in the direction s, at an angle ϑ with x, such that:

$$\tan \vartheta = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)}{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)} \qquad \text{numeric} \quad (9)$$

Digitized by Google

In a simple rotating rotating-current field, this angle ϑ increases steadily with time, and η, as a rotating radius vector at any point, is constant at the value $\frac{I\varrho}{ab}$ given by (4). That is the intensity η increases directly with the current density in the sheet, which is:

$$\delta = \frac{I}{ab} \qquad \text{amperes per sq. cm.} \quad (10)$$

and also directly with the resistivity of the metal in the sheet.

In the case considered, the rotating current-density vector attained the value $\delta = \frac{20}{81{,}5 \times 0{,}046} = \frac{20}{3{,}75} = 5{,}33$ amperes per sq. cm., and the intensity η was 35,2 microvolts per cm. Consequently, in order to obtain the strongest rotating electric intensity effects, it is desirable to employ a sheet of as high uniform resistivity as possible, and to operate it at as high a current density in the metal as possible. A thin sheet is preferable to a thick sheet, to the extent that a given current density is reached with a correspondingly weaker current. On the other hand, a very thin sheet is apt to vary more in its thickness than a moderately thin sheet; so that if ample current strength can be obtained, there is no practical advantage in seeking for a very thin sheet. There is every advantage, however, in employing for the substance of the sheet a high-resistivity metal, provided that the resistivity is uniform over the sheet. The rotating electric intensity may be regarded as a vector ϱ times the length of the rotating current-density vector.

The maximum rotating voltage in the sheet, as measured with respect to the center of symmetry O, Figs. 1 and 4, is:

$$E\,x = \eta \qquad \text{volts} \quad (11)$$

which, with a given maximum available electric intensity η, increases with the radial distance x cm. and is, therefore, proportional to the length of the sheet edge. Doubling the linear dimensions of the sheet, doubles the current strength that must be supplied in each component in order to maintain the current density, and doubles the total rotating vector voltage available. Expressing the same conditions in another way, the smaller the sheet edge, the greater must be the maximum current density in the sheet in order to obtain the same total rotating vector voltage.

Digitized by Google

The Vibration Galvanometer.

Any form of vibration galvanometer, sensitive to low-frequency alternating currents, may be used for revealing and utilizing the rotating current field in the sheet. The instrument used in

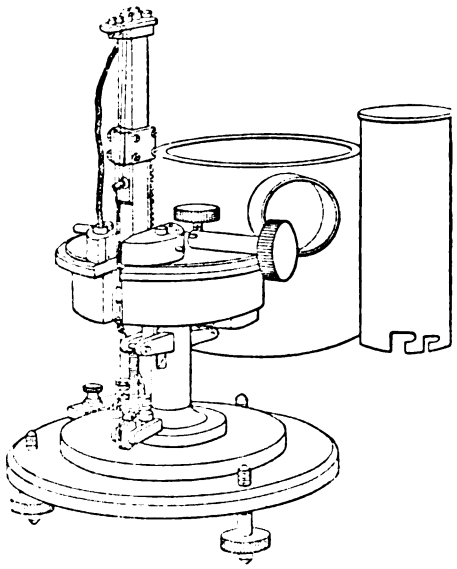


Fig. 5.

the experiments described was a Campbell vibration galvanometer, made by R. W. Paul of London, and is shown in Fig. 5, with its cover removed. It consists essentially of a D'Arsonval galvanometer with a very small coil, the suspension being bifilar, and adjustable both in length and in tension; to as to be tunable in its vibrations, about a vertical axis, to the frequency of the alternating currents passing through the suspension and coil. Such an instrument responds powerfully to the passing current, when sharply attuned; but only very feebly if out of tune. At a frequency of 60 cycles per second, it gives a distinct oscillatory deflection with a current of 0,25 r. m. s. microampere, and with a resistance of approximately 36 ohms, was therefore able to indicate the presence of 9 r. m. s. microvolts. The ef-

Digitized by Google

fective resistance of such an instrument, when in vibratory operation, differs from that found when it is stationary, owing to the influence of the emf. induced in the winding by its vibration in the magnetic field of the permanent magnet.

Influence of Impurities in the Alternating Currents supplied to the Sheet.

The degree of precision with which a very feeble alternating current can be detected by the galvanometer when in tune, depends to some extent upon the purity of the alternating current supplied to the sheet from the alternator MM, Fig. 4. If the current has only one frequency, and a pure sinusoidal waveform, then it is easy to bring the reflected spot of light to rest on the scale by bringing the current strength to zero; but if there are several frequencies in the current, i. e. if the current wave is impure, and contains harmonics, the fundamental frequency component may be reduced to zero, and yet the harmonics may have considerable strength. Consequently, although the galvanometer is tuned only to the fundamental component, the higher components are able to produce some relatively small disturbance of the galvanometer light-spot, by forced vibrations. Such forced vibrations, small as they are, reduce the sensibility of the instrument in the adjustment to zero of the fundamental-frequency current. It is, therefore, desirable to employ a generator MM, Fig. 1, giving as nearly as possible a single-frequency or simply harmonic emf.

If harmonics are present in the two equal alternating currents supplied to the sheet, the rotation of the electric-current and electric-intensity fields will not be simple circular rotations. They may, however, always be resolved into a pure circular rotation of fundamental angular velocity ω radians per second, plus a pure circular rotation of angular velocity 3ω, plus another of 5ω, and so on. Since the vibration galvanometer is tuned only to the fundamental, the more rapidly rotating harmonic fields do not affect its indications, except in disturbing its zero sensitiveness, as above mentioned.

Digitized by Google

Branch Circuit Connections to the Sheet.

If a thin flexible wire is soldered on the center 0 of the plate Fig. 4, and another to a point 1, along the reference axis, at a distance of say $-r_0$ cm., then the p. d. between these two points will be at any instant, t seconds after the rotating current coincides with 1,0:

$$e_{10} = r_0 \eta \cos \omega t \qquad \text{volts (12)}$$

Similarly, if a third wire makes contact with the sheet at the point 3, at a distance $+r$ cm. along the reference axis, the p. d. between the center 0 and 3 will be

$$e_{03} = r\eta \cos \omega t \qquad \text{volts (13)}$$

But if the third wire makes contact with the sheet at some other point 2, z cm. from 0, in a direction making a positive angle ϑ with the reference axis; then with the direction of current rotation clockwise, as shown in Fig. 4, the p. d. in 0,2 will be ahead in phase of the p. d. in 0,3, and at any instant its value will be:

$$e_{02} = z\eta \cos (\omega t + \vartheta) \qquad \text{volts (14)}$$

Development of a Vector Diagram on the Sheet.

If now we connect a non-inductive resistance R_0 ohms Fig. 4, in series with a resistance R to be tested, in circuit with the wires 1, 1 and 2, 2, leading to the sheet; then if R is also a non-inductive resistance, no current will flow through the vibration galvanometer G on depressing the key K if the wire 2 makes contact with the sheet at some point 5, such that:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{r}{r_0} \qquad \text{numeric (15)}$$

or

$$\frac{R}{r} = \frac{R_0}{r_0} \qquad \text{ohms/cm. (16)}$$

This is because, by reason of the absence of appreciable inductance or reactance in the circuit branch 1, 1, R_0, R, 2, 3, the alternating current in this branch will have the same phase as

Digitized by Google

the alternating potential-difference between the points 1,3. Again, the p. d. between 1 and *o*, the junction of R_0 and R, will be $\frac{R_0}{R_0 + R}$ of the total p. d. between the points 1 and 3 on the sheet, neglecting the resistances of the leads 11, 23. But the p. d. between 1 and 0 on the sheet must be $\frac{r_0}{r_0 + r}$ of the total p. d. between the points 1 and 3 on the sheet. Consequently the junction *o*, and the center 0 of the sheet, will have at all times, under condition (4), the same potential and phase; so that the galvanometer G connecting these points will carry no current.

If we select the standard resistance R_0 of such magnitude that it is numerically equal to the distance r_0 on the sheet; then the distance r cms. between *o* and the balancing contact point 3 will read off directly the resistance of R in ohms. When R_0 ohms cannot conveniently be made numerically equal to r_0 cm.; it may be possible to have R_0 some decimal multiple or submultiple of r_0; so as to have the corresponding decimal ratio between r and R.

If the resistance R under test as a certain reactance $X = L\omega$ ohms; where L is the inductance of the coil in henries; then its impedance will be:

$$Z = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2} \,\angle \vartheta \qquad \text{ohms} \;\angle \qquad (17)$$

It will then be found necessary, in order to have no current through the galvanometer, to transfer the contact from the point 3 to the point 2 of the sheet, through a distance jx cm., such that:

$$\frac{Z}{z} = \frac{R + j\dot{X}}{r + jx} = \frac{R_0}{r_0} \qquad \text{numeric} \qquad (18)$$

That is, the radius-vector 0,2 on the plate, after balance is found at G, measures the impedance of the coil under test, both as to magnitude Z, and angle ϑ; or, in mathematical language, both as to modulus and argument.

The reason for the relation (18) is found in the fact that owing to the inductive reactance in the coil under test, the current in this coil must lag ϑ degrees behind the emf. impressed upon its terminals; whereas the current in the non-inductive standard resistance R_0 must be in phase with the emf. at its terminals. If then the current in Z is to have the same

Digitized by Google

magnitude and phase as the current in R_0, the emf. impressed on Z must be sufficiently advanced in phase with respect to the emf. impressed on R_0. This is accomplished by carrying the roaming contact on the plate to a point 2, such that the galvanometer wire 0*o* carries no current; that being the condition necessary for the currents in R_0 and Z to be identical, both in phase and magnitude. The angle ϑ on the sheet, between the reference axis 0,3 and the radius vector 0,2, measures the advance

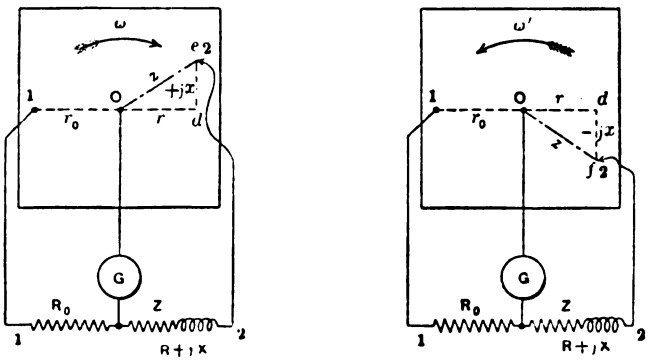


Fig. 6.

of phase impressed on Z, 0,3 measures the effective resistance R of the coil, while $j3,2 = jx$ measures the effective reactance jX, at fundamental frequency. That is, the vector diagram of the impedance is designated on the sheet in the triangle 0,3,2.

If the direction of rotation of the current field is reversed, by reversing either of the two component single-phase currents, the direction of the impedance diagram is obviously reversed, as indicated in Fig. 6.

Various Interpretations of which the Vector Diagram is susceptible.

It may be observed that such a vector diagram as that shown at 0,3,2 in Fig. 4 may be considered either as a vector diagram of impedance in the coil Z to a scale of ohms; or as a vector diagram of voltage in the coil Z to a scale of volts; or as a vector diagram of power in the coil Z to a scale of watts; or as a vector diagram of cyclic energy in the coil Z to a scale of

Digitized by Google

joules. Thus, if in Fig. 4 the vector diagram of a certain tested coil gives $r = 32$ cm., $x = 24$ cm.; then $Z = 40$ cm. and $\vartheta = 36{,}87°$ (1). If the standard resistance R_0 has one ohm per cm. in r_0, this would be interpretable as an impedance diagram of

$$40 \angle 36{,}87° = 32 + j24 \text{ ohms.}$$

But a certain feeble r. m. s. alternating current I flows from the sheet into the branch circuit of the coil, and multiplying the diagram by I, this produces a certain vector fall of potential

$$IZ \angle \vartheta = IR + jIX \text{ r. m. s. volts} \qquad (19)$$

Without pausing to determine the precise strength of this current, which, neglecting resistances in leads, is $\eta (r_0 + z) / (R + Z)$ vector amperes; we may consider that if this current were just one ampere, the vector diagram would represent a resultant or apparent drop of pressure of $40 \angle 36{,}87°$ volts in the coil, to the phase of the current as standard, or 32 effective volts $+ j24$ reactive volts. To a suitably changed scale, the diagram would represent the actual drop of pressure with the actual current. Multiplying the diagram a second time by I, we obtain the resultant or apparent power expended in the coil.

$$P \angle \vartheta = I^2 Z \angle \vartheta = I^2 R + j I^2 X \text{ watts} \qquad (20)$$

If we take I as 1 ampere, this would make the diagram a watt-diagram, with an apparent or resultant power consumption in the coil of $40 \angle 36{,}87$ watts (2) to current standard phase; i. e. 32 effective watts, rejected or dissipated, and $j24$ reactive watts, retained or undissipated in the circuit. To a suitably changed scale, the diagram would continue to represent the actual power in the coil, whatever the actual value of the current I.

Again, dividing the power by 2ω, the diagram gives the apparent or resultant maximum cyclic energy in the coil, viz.:

$$W_m \angle \vartheta = \frac{P \angle \vartheta}{2\omega} = \frac{I^2 R}{2\omega} + j \frac{I^2 X}{2\omega} \text{ joules} \qquad (21)$$

$$= W_f + j W_k \text{ „} \qquad (22)$$

(1) Angles are here expressed in degrees and decimals of a degree.

(2) *Vector Power in Alternating-Current Circuits*, by A. E. KENNELLY. " Trans. American Institute of Electrical Engineers „. June, 1910, p. 1044.

Digitized by Google

Here $W_m \angle \vartheta$ is the apparent or resultant cyclic energy thrown into and out of the coil in each energy cycle, over and above a steady energy release of $I^2 R$ joules per second; while $\frac{I^2 R}{2\omega}$ is the effective or dissipative cyclic energy so thrown, and $\frac{I^2 X}{2\omega}$ the reactive or non-dissipative cyclic energy. For unit current strength $I = 1$ r. m. s. ampere, and $\omega = 377$ radians per second, the vector diagram shows that the resultant cyclic energy in the coil would be $40/754 = 0{,}053$ joule, the effective cyclic energy $W_r = 32/754 = 0{,}042$ joule, and the reactive cyclic energy $W_x = 24/754 = j\,0{,}032$ joule, over and above a steady dissipation of $I^2R = 32$ joules per second. The reactive cyclic energy of 0,032 joule would be added harmonically to an average reactive energy of 0,032 joule, causing a total range of reactive energy between 0 and 0,064 joule, twice in each current cycle, and corresponding to

$$2\,W_x = \frac{1}{2}\,L\,I_m^2 = L\,I^2 \text{ max cyclic joules} \quad (23)$$

where $L = 0{,}064$ henry, the inductance of the coil, $I_m = 1{,}414$ maximum cyclic amperes, and $I = 1$ r. m. s. ampere. If the vector diagram with the above scale of dimensions ($r = 0{,}042$, $x = 0{,}032$, $z = 0{,}053$) be mounted on a car wheel with the vertex 0 at the center, the tread radius being equal to r, and the flange radius equal to z; then when the wheel is set rolling along a horizontal rail with the angular velocity 2ω radians per second, the horizontal projection, on the rail, of a suitably selected point on the rotating flange, will mark the energy dispensed in the coil from moment to moment, and the path of the moving point in space will be an oblate trochoid for a circuit containing reactance, and a cycloid for a non-inductive circuit. The horizontal velocity of the wheel center, parallel to the rail, would be the average power dissipated in the coil, or the effective power.

Conditions for maximum sensitiveness in development of Vector Diagrams.

The conditions requisite for maximum sensibility in plotting vector diagrams on the sheet are discussed in Appendix B. It is shown that for a galvanometer of given sensitiveness, as determined by the *galvanometric distance*, or the minimum distance

Digitized by Google

separating its electrodes on the sheet, in order to detect current, there is, for the roaming contact, a circle of uncertainty on the sheet (assumed otherwise without defect), whose radius is the galvanometric distance increased in a certain augmentation ratio, depending on the impedances in the test-circuit. With a galvanometer of low resistance, the radius of the *circle of uncertainty* of the roaming contact on the sheet rapidly increases as the impedance of the tested coil passes the resistance of the galvanometer. A high-impedance test coil thus calls for a high-resistance galvanometer, assuming that the galvanometric distance can be kept constant, or, in other words, that the sensitiveness of the galvanometer to impressed terminal voltage can be kept constant.

Method of Connection with the Roaming Contact between two Fixed Contacts.

If we connect the branch circuit of R_0 and Z between two fixed points on the sheet, such as the points 1 and 3 in Fig. 7,

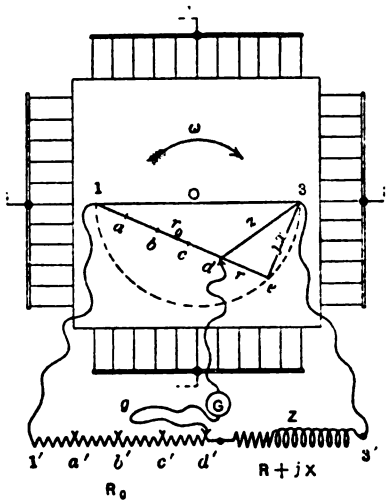


Fig. 7.

we are able to plot on the sheet the impedances, potentials, powers, and cyclic energies, of as many points as we can reach with a wire from the vibration galvanometer.

Thus, in Fig. 7, by connecting the galvanometer wire g to the

Digitized by Google

successive points a', b', c', d' of a constant non-inductive resistance R, we find corresponding balance points of zero galvanometer current with the roaming contact on the sheet at points a, b, c, d, respectively. These points lie theoretically on a straight line ae, which intersects a semicircle drawn on the line 1,3, as diameter, in the point e, such that $1e : e3 :: (R_0 + R) : X$.

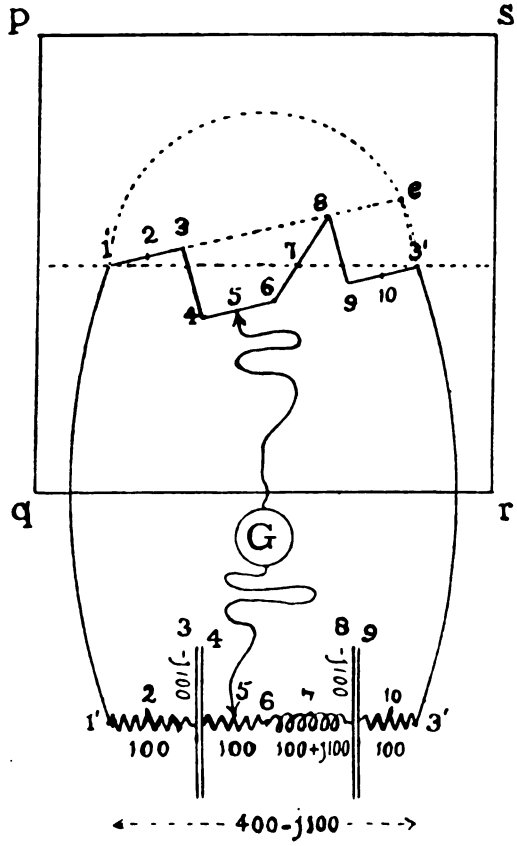


Fig. 8.

The line 13 here represents the impedance of the branch circuit, $1e$ its total resistance, and $e3$ its reactance. Or, of the total p. d. 1,3, on the sheet, the component $1,e$ is expended on resistance, and $e3$ on the reactance, of the shunt circuit. Or, of the total power 1,3, on the sheet, the component $1,e$ is expended in resistance, and $e,3$ is developed, undissipated, in the reactance.

A more complex branch circuit is represented in Fig. 8, con-

Digitized by Google

sisting of a non-inductive resistance 1'3 of 100 ohms, a condenser 3,4 of $-j100$ ohms, a non-inductive resistance 4,6 of 100 ohms, a reactive coil 6,8 of impedance $100+j100$ ohms, a condenser 8,9 $pf-j100$ ohms, and a non-inductive resistance of 9,3', of 100 ohms. The total impedance of the branch circuit is therefore $400-j100$ ohms $= 411\ \angle 14°$ ohms. The vector diagram mapped out on the sheet is 1' 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 3'. The diameter 1'3' may be regarded as the vector impedance of 411 ohms, the line 1'*e* as the total resistance of 400 ohms and the perpendicular line *e*3' as the total reactance of 100 ohms.

Plotting the Vector Diagrams of Circuit Networks.

In a similar manner, a plurality of separate branch circuits might have their potential loci plotted on the sheet, one by one; or, a network of interconnected branch circuits might be so treated as a whole.

Particular Case of a Circular Locus.

In Fig. 9, a branch circuit is connected to points 1 and 2 on the sheet, as in Figs. 7 and 8; but instead of the galvanometer

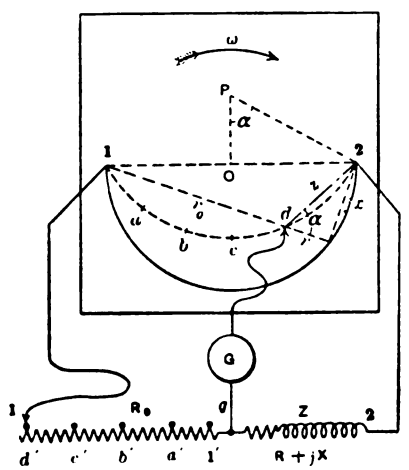


Fig. 9.

wire being shifted along the circuit, the galvanometer wire *g* is fixed, and the non-inductive resistance R_0 is varied by successive steps, *a' b'*, *c'*, *d'*. It is then found that the corresponding

Digitized by Google

balance points of the roaming contact a, b, c, d, lie on a circle, whose center is at P, on the perpendicular from 0, the midpoint on the line 1 2, such that the angle 2 P 0 is equal to α, the angle of the impedance under text. The proof of this proposition is given in Appendix C.

Precautions against Stray Magnetic Field Threading the Galvanometer Circuit.

When the electric current field is rotating in the sheet, the magnetic intensity H near to the surface is not very powerful, being approximately:

$$H = \frac{4\pi}{20} \cdot \frac{i}{a} = \frac{4\pi}{20} \cdot \frac{I_m \cos \omega t}{a} \text{ gilberts per cm.} \quad (24)$$

Thus, in the case considered, vith $a = 81{,}5$ cm. and $I_m = 20$ amperes, flowing along the axis of reference, the magnetic intensity H across the sheet; or in the direction of the j-axis, is $0{,}1544 \cos \omega t$ gilberts per cm., producing in the air a like flux-density of $0{,}1544 \cos \omega t$ gauss. This magnetic field rotates (with some irregularity of velocity) following the rotating current. If, in such an arrangement, for example, as that in Fig. 4, a strict balance point is found, but the galvanometer circuit OKGO and its return branches include some of this stray flux, there will be an emf. induced in this circuit, which will produce a single-phase current through the galvanometer and upset the balance. This may readily happen experimentally, if the wires 1 1, and 2 2 lie flat upon the sheet; while the central wire 0o rises up from it, so as to form a loop into which the rotating field may pass. Or even if all three wires lie flat upon the sheet, stray magnetic flux from the fringe wires and main leads outside the sheet may link with the galvanometer circuit. Ten maxwells of magnetic flux, such as would pass cyclically through an area of 65 sq. cm. with the flux density of $0{,}1544 \cos \omega t$ gauss, would induce an emf. of 3,770 abvolts, or 37,7 microvolts = 26,6 microvolts r. m. s. at the frequency of 60 cycles per second ($\omega = 377$ rad./sec.). If the resistance of the galvanometer circuit were 50 ohms, this would set up a current of 26,6/50 = 0,53 microampere, a very perceptible current. It was found desirable to bring all three wires on the sheet flat to the center, and to carry them spiralled in a strand from this point to the galva-

Digitized by Google

nometer, at some distance away. Even with all such precautions, it was found very difficult to eliminate all disturbance due to stray magnetic flux. Balance measurements were therefore made in pairs; that is, each measurement was repeated, with the switches reversed in the exciting circuits. Reversing simultaneously both currents supplied to the sheet does not reverse the direction of rotation of the current field in the sheet; but does reverse the stray flux in the galvanometer circuits. Consequently, the mean of the two readings of the roaming contact on the sheet taken with the supply circuit switches (1) both normal, and then (2) both reversed, may ordinarily be accepted as the true reading corrected for stray flux.

Applications.

The only apparent applications for the rotating electric current field are (1) to teaching, and (2) to measuring alternating current vector phenomena. Since the degree of precision in the measurements as above described, is much less than is obtainable in the best single-phase measuring apparatus, the principal application at present is for the demonstration of vector-diagrams to students. There can be no doubt that anyone who sees a vector-diagram produced by the apparatus, carries away a concrete idea of such diagram very different from that obtainable merely from reading a text-book on alternating currents. As an aid to the demonstration of many theorems in alternating-current vector analysis, the apparatus is found to be invaluable. It is easily operated, and does not easily get out of order.

Only a few of the vector-diagrams capable of being produced by the apparatus have been described in this paper, and, with its aid, a wide field for vector research lies open to investigation. It is hoped that some pupil of Galileo Ferraris may appropriately take up such investigation.

Digitized by Google

APPENDIX *A*.

Estimation of Error in the Current Sheet Distribution due to the Fringe of Connecting Wires on each edge.

An approximate estimate of the error caused by the fringe of connecting wires along each edge of the sheet may be made very easily, by substituting for these wires equivalent strips of the sheet, and then welding these separate strips into a lateral extension in the plane of the sheet.

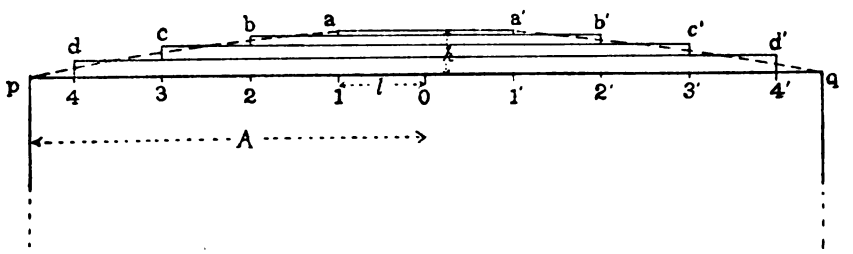


Fig. A.

Let *pq* Fig. A represent one edge of the plate, and let one connecting wire be soldered at *o* the middle point. At uniform distances of l cm. on each side of *o*, let other wires be soldered at 1, 1′, 2, 2′, 3, 3′, 4, 4′. Let the resistance of each of these single fringe wires be R_f ohms, and let the resistance in the copper strap BB, Fig. 1, be neglected. Let b be the thickness of the sheet in cm. and ϱ its resistivity in ohm-cm. Then the points 1, 1′ on the edge, $2l$ cm. apart, being connected externally by a loop of resistance $2R_f$ ohms, are virtually connected by a strip of the substance and thickness of the sheet $2l$ cm. long and of such breadth x_1 cm. as satisfies the relation:

$$2R_f = \frac{2l\varrho}{bx_1} \qquad \text{ohms (1)}$$

or:

$$x_1 = \frac{l\varrho}{bR_f} \qquad \text{cm. (2)}$$

Digitized by Google

This equivalent strip is represented in Fig. A at $a\,a'$.

Similarly, the points 2, 2′, on the edge, $4l$ cm. apart, are externally connected by a resistance $2R_f$ ohms. They are likewise virtually connected by a strip of the sheet of width with x_2, such that:

$$2R_f = \frac{4l\varrho}{bx_2} \qquad \text{ohms (3)}$$

or:

$$x_2 = \frac{2l\varrho}{bR_f} = 2x_1 \qquad \text{cm. (4)}$$

This equivalent strip is indicated in Fig. A at bb'.

Again, the points 33′, $6l$ cm. apart, are connected externally by a resistance $2R_f$ ohms. They are virtually connected by a strip of the sheet $6l$ cm. long and $x_3 = 3x_1$ cm. broad, indicated by cc' in Fig. A, and so on.

If we connect all these strips side by side, we virtually extend the sheet sideways along the broken line p, d, c, b, a, a', b', c', d', q, in Fig. A, the total breadth at the center being

$$h = x_1\left(1+2+3+\ldots..+\frac{N-1}{2}\right) \qquad \text{cm. (5)}$$

$$= \frac{x_1}{8}(N^2-1) \qquad \text{cm. (6)}$$

where N is the total odd number of wires on each edge. If the half length pq of the edge is A cm., the ratio:

$$\frac{h}{A} = \frac{x_1}{8A}(N^2-1) = \frac{l\varrho}{8Ab\,R_f}(N^2-1) \qquad \text{numeric (7)}$$

is a rough measure of the distortion of the current in the sheet, when flowing parallel to pq, owing to the presence of the fringe wires.

In the case considered, with $l = 7$, $b = 0{,}046$, $\varrho = 6{,}6 \times 10^{-6}$, and $R_f = 0{,}836$, $x_1 = 1{,}2 \times 10^{-3}$ cm. Also $N = 11$; so that $h = 15x_1 = 1{,}8 \times 10^{-2}$ cm. With $A = 40{,}75$ cm., the ratio h/A is $0{,}44 \times 10^{-3}$ or the sheet would be virtually expanded laterally in the ratio 1,00044.

Digitized by Google

APPENDIX *B*.

Conditions for Maximum Precision in Measuring an Impedance Vector Diagram on the Sheet with the Connections of Figure 4.

The actual connections of the vibration galvanometer, standard resistance and tested impedance, as contained in Fig. 4, are

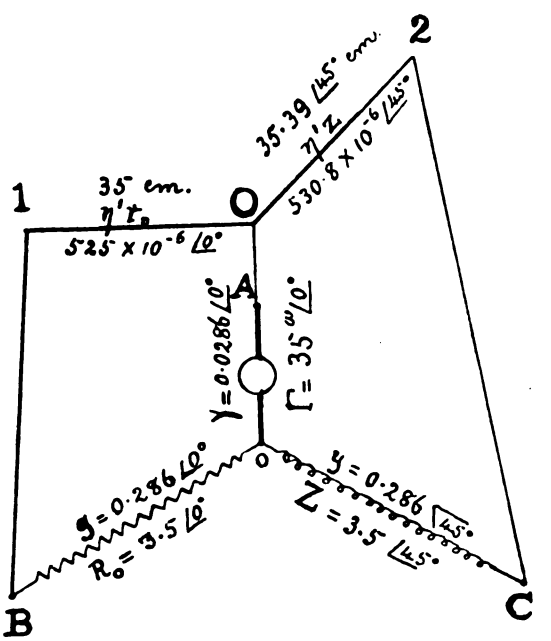


Fig. B 1.

reproduced in Fig. B1. In the line 10 of the sheet, there will be a rotating p. d. of $\eta' r_o$ r. m. s. volts, if η' is the r. m. s. value of the electric intensity, and r_o is the distance 1, 0, in cm. Similarly, in the line 0, 2, between o and the balance point 2 of the roaming contact, there will be a rotating p. d. of $\eta' z$ r. m. s. volts, if z is the vector distance 0, 2, in cm. |__ .

Let Γ = the impedance of the galvanometer (ohms |__

Let R_o = the resistance of the non-inductive standard resistance (ohms |__).

Let Z = the impedance of the coil under test (ohms |__).

Digitized by Google

Let $\gamma = \frac{1}{r}$ the admittance of the galvanometer (mhos |_).

Let $g = \frac{1}{R_o}$ the conductance of the non-inductive standard resistance (mhos |_).

Let $y = 1/Z$ the admittance of the coil under test (mhos |_). Now replace the star ABC of three impedances with its equivalent delta, *abc*, Fig. B 2 (1). The admittances of the three delta sides are indicated in the Figure.

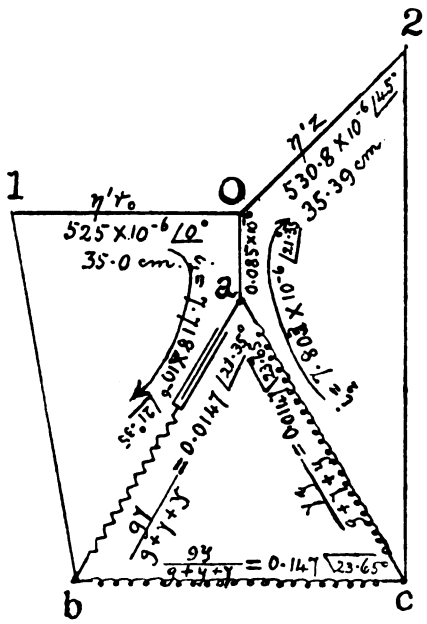


Fig. B 2.

Let i_1 be the current flowing through the equivalent circuit 10*ab* (r. m. s. amperes |_).

Let i_2 be the current flowing through the equivalent circuit *o*2*ca* (r. m. s. amperes |_).

Then

$$i_1 = \eta' r_o \frac{g\gamma}{g+\gamma+y} \quad \text{r. m. s. amperes } \lfloor \quad (1)$$

$$i_2 = \eta' z \frac{\gamma y}{g+\gamma+y} \quad \text{" " } \quad (2)$$

(1) *The Equivalence of Triangles and Three-Pointed Stars in Conducting Networds,* by A. E. KENNELLY. " Electrical World and Engineer ", Sept. 16th, 1899, vol. 34, N. 12, pp. 413-414.

Digitized by Google

When these two vector currents, which have opposite circuital directions, are equal and opposite in phase, their vector sum vanishes, and no current will flow through the galvanometer. It is only possible, in general, to reduce the current to the minimum perceptible value Δi r. m. s. amperes, which the instrument can detect, when properly tuned. So that, subtracting (2) from (1) and equating to this minimum perceptible current,

$$\Delta i = \frac{\eta'\gamma}{g+\gamma+y}(r_o g - zy) \text{ r. m. s. amperes} \quad (3)$$

$$= \frac{\eta'\gamma}{g+\gamma+y}\left(\frac{r_o}{R_o} - \frac{z}{Z}\right) \quad " \quad " \quad (4)$$

Let $Z = \beta R$; where β is a vector numerical coefficient; then:

$$\Delta i = \frac{\eta'\gamma g}{g+\gamma+y} \cdot \frac{(\beta r_o - z)}{\beta} \text{ r. m. s. amperes} \quad (5)$$

The vector distance $(\beta r_o - z)$ is the displacement produced on a perfect rotating-current sheet, owing to the existence of a minimum detectible current Δi. Calling this displacement Δz cm., we have:

$$\Delta i = \frac{\eta'\gamma g}{g+\gamma+y} \cdot \frac{\Delta z}{\beta} \text{ r. m. s. amperes} \quad (6)$$

But if we denote by Δs the *galvanometric distance;* or the minimum distance on the sheet, in any direction, to which the two terminals of the galvanometer can be directly brought, in order to produce the minimum detectible current; we have:

$$\eta' \frac{\Delta s}{\Gamma} = \eta'\gamma\Delta s = \Delta i \text{ r. m. s. amperes} \quad (7)$$

Substituting in (6)

$$\Delta s = \frac{g}{g+\gamma+y} \cdot \frac{\Delta z}{\beta} \text{ cm.} \quad (8)$$

or

$$\Delta z = \beta\Delta s \cdot \frac{g+\gamma+y}{g} \quad " \quad (9)$$

This shows that the displacement error in the balance point is $\beta\left(\frac{g+\gamma+y}{g}\right)$ times the galvanometric distance. The roaming contact can travel anywhere within a small circle on the sheet without producing a detectible indication on the galvanometer.

Digitized by Google

This circle may be called the *circle of uncertainty*. Its radius is Δz cm.

The relative error of the measured vector diagram is however determined by the ratio:

$$\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta s}{r_o} \cdot \frac{g+\gamma+y}{g} \qquad \text{numeric} \quad \text{(10)}$$

since Z is very nearly equal to βr_o cm. The ratio $\frac{g+\gamma+y}{g}$ may be called the *augmentation ratio* of the apparatus.

Consequently, in order that the relative error in the measured vector diagram may be a minimum, we must have a minimum galvanometric distance Δs, which means a sensitive galvanometer, and a high electric intensity η' in the sheet. We must also have a minimum value of the augmentation ratio $\frac{g+\gamma+y}{g}$, the vector ratio of the sum of the admittances to the standard admittance g. In general, γ should therefore be kept small with respect to g and y, and the two latter should be nearly equal numerically ($\beta = 1$).

That is, the impedance tested should have approximately the same number of ohms as the standard, and neither should be large with respect to the galvanometer impedance Γ. Inserting impedance artificially in the galvanometer wire does not, however, diminish the relative error; because although it slowly diminishes the augmentation ratio $\frac{g+\gamma+y}{g}$, yet it will increase Δs more rapidly.

As an example, let $r = 35$ cm., $\eta' = 15 \times 10^{-6}$ r. m. s. volts per cm., $R_o = 3{,}5 \,|\underline{0^o}$ ohms, $Z = 3{,}5 \,|\underline{45^o}$ ohms, $\Gamma = 35 \,|\underline{0^o}$ ohms, $\Delta e = 3 \times 10^{-6}$ r. m. s. volts $|_$. Then $\beta = 1$, $g = 0{,}286 \,|\underline{0^o}$ mho, $y = 0{,}286 \,|\overline{45^o}$ mho, $\gamma = 0{,}0286 \,|\underline{0^o}$ mho. The augmentation ratio is $\frac{0{,}286 + 0{,}0286 + 0{,}286 \,|\overline{45^o}}{0{,}286} = 1{,}94 \,|\overline{22{,}2^o}$. The galvanometric distance $\Delta s = 0{,}2$ cm. The minimum detectible displacement on the sheet at the roaming contact will therefore be $\Delta z = 0{,}2 \times 1{,}94 \,|\overline{22{,}2^o} = 0{,}388 \,|\overline{22{,}2^o}$ cm., and the same effect is produced at any phase angle of Δz, which is the radius (3,88 mm.) of the circle of uncertainty. The minimum relative error in the vector diagram will be $\frac{0{,}388}{35} = 0{,}0111$ or 1,11 per cent, in an indeterminate direction.

Digitized by Google

APPENDIX *C*.

Determination of the Circular Locus of Balance Points on the Rotary-Current Sheet with Diametral Taps to a Coil and Variable Additional Resistance in its circuit.

If a coil has a simple harmonic $Z \angle \alpha = R + jX$ impedance ohms, and is connected in series with a non-inductive resistance

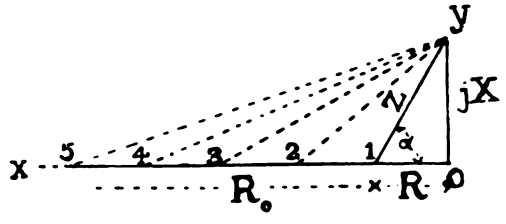


Fig. C 1.

R_0 ohms to which successive increments can be given, the impedance diagram of the circuit is as shown in Fig. C1, a right-angled triangle with variable base and constant perpendicular jX. The locus of the diagram is the straight line ox.

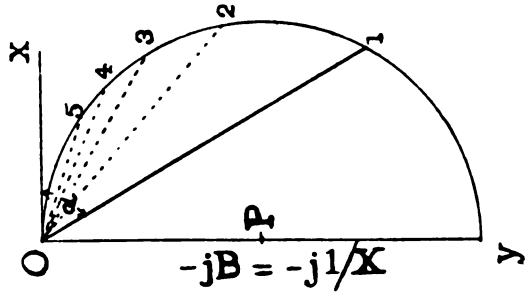


Fig. C 2.

If the admittance of the same branch circuit

$$Y = 1/(R_0 + R + jX)$$

is computed, it is readily shown to lie upon a semicircle, Fig. C2, whose diameter is on a j-line, 1/X in length. The successive

Digitized by Google

points 1, 2, 3, 4 and 5 on this semi-circle are readily found from the fact that the negative angle $x02$ say in Fig. C2 is equal to the corresponding positive angle $02y$ Fig. C1.

The reason for the development of a circular locus is found in the well known proposition that if the locus of a given variable vector quantity lies on a circle, the locus of its reciprocal will also lie on a circle. A straight line being a circle of infinite radius, is a case in point.

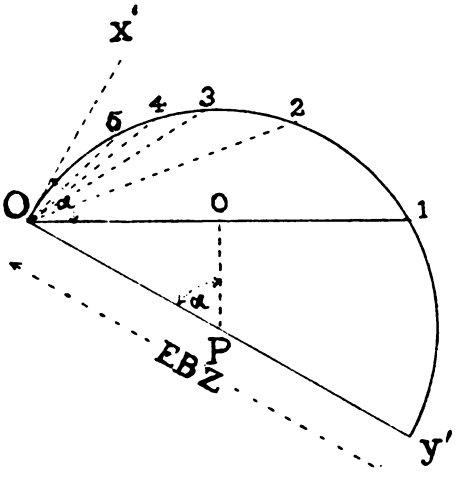


Fig. C 3.

The vector alternating-current strength I in the branch circuit is also given by Fig. C2, to a different scale, if the impressed alternating emf. E r. m. s. volts on the circuit is constant, and taken of standard phase, since:

$$I = EY \qquad \text{Amperes } \angle\ (1)$$

The drop of pressure IZ on the coil Z forming part of the branch circuit is derived by multiplying I by the constant vector impedance $Z \angle \alpha$. This is equivalent to changing the scale of the drawing and rotating the segment 1, 2, 3, 4, 0 through an angle α and such that 01 becomes horizontal, as in Fig. C3. The line $0x$, horizontal in Fig. C2, becomes rotated into the line $0x'$ making a positive angle α with the horizontal in Fig. C3, but perpendicular to $0Py'$. If Po be drawn perpendicularly to 01, the angle $0Po = \alpha$ since oP and P0 are respectively perpendicular to 01 and $0x'$.

Digitized by Google

In the arrangement of Fig. 9, the IZ drop is measured back from terminal 2 on the sheet. Thus $2d$ in Fig. 9 is the vector drop of potential in the coil Z. This is equivalent to changing the direction of the current I, or of taking a $-$ IZ potential drop. If we rotate the diagram of Fig. C3 about the point 0 through 180°, so as to apply negative signs to each and every vector, we obtain the diagram in Fig. C4; where $0x$ is opposite to $0x'$ and $0y$ to $0y'$. This leads at once to the locus determined by observation in the arrangement of Fig. 9.

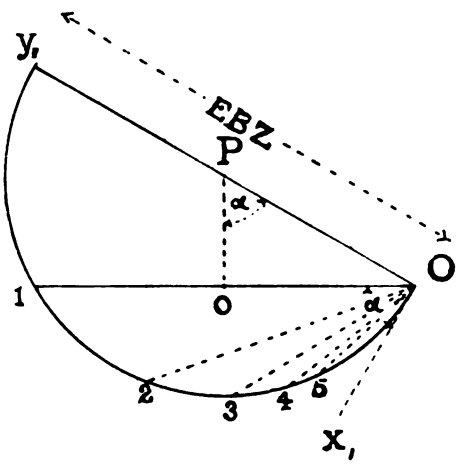


Fig. C 4.

Consequently, to construct the circular locus of Fig. 9, draw the diametral line 1, 2, on the sheet, connecting the two electrodes. Through the center 0, draw the perpendicular 0P. From the point P where the angle $2P0 = \alpha$ draw the line P2. With center P and radius P2, describe the circular locus $2c1$. At any point d' of the variable resistance R_0, the corresponding point d on the locus is found by making the angle $d12 = \tan^{-1} \frac{X}{R_0 + R}$.

List of Symbols employed.

a Length of edge of a square sheet (cm.).

$A = a/2$ Half length of edge, or distance from edge to center (cm.).

Digitized by Google

$\alpha = \tan^{-1}(X/R)$ Angle of an impedance (degrees or radians).

$B = 1/X$ Reciprocal of coil reactance (mhos).

b Thickness of sheet (cm.).

$\beta = Z/R$ Vector ratio of a tested impedance to a standard resistance (numeric ⌊_).

δ Current density in sheet (amperes per sq. cm.).

∂ Sign of partial differentiation.

E E. M. F. between opposite edges, or other two points of a sheet (volts).

Δe Minimum detectible alternating emf. impressed on galvanometer terminals (volts ⌊_).

e, e_{10}, e_{02}. Instantaneous emf. in sheet, and between two points (volts).

η Electric intensity in sheet (volts per cm.).

η_x Electric intensity in a particular direction x (volts per cm.).

η^1 R. M. S. electric intensity in sheet or portion thereof (volts per cm.).

ϑ Angle between a plane vector and a reference line (radians or degrees).

f Frequency of alternating current (cycles per second).

$g = 1/R_0$ conductance of a non-inductive standard resistance (mhos).

$\gamma = 1/\Gamma$ admittance of galvanometer (mhos ⌊_).

Γ Impedance of galvanometer (ohms ⌊_).

h Total breadth of equivalent lateral extension of sheet due to fringe (cm.).

H Magnetic intensity near sheet (gilberts per cm.).

I_m, I. Maximum cyclic and r. m. s. values of a current strength (amperes).

i Alternating instantaneous current strength (amperes).

i_1, i_2. R. M. S. vector alternating-current strengthes (amperes ⌊_).

Δi Minimum perceptible r. m. s. vector current in galvanometer (amperes).

$j = \sqrt{-1}$ The operator which rotates a vector through $+ 90^\circ$ in the plane of reference.

L Inductance of a tested impedance (henries).

N Number of wires in the fringe along one sheet edge (odd integer).

$\pi = 3{,}14159$.

Digitized by Google

R_0 Standard non-inductive resistance (ohms).

R Effective resistance of a tested impedance (ohms).

R_f Resistance of a single fringe wire (ohms).

r r_0 Distances on sheet measured from an electrode along the reference axis in relation to the external resistances. RR_0 (cm.)

r. m. s. An abbreviation for the " root-mean-square „ value of an alternating quantity.

ϱ Resistivity of a metal (ohms-cm.).

s Distance in any direction from a point along a sheet (cm.).

Δs Minimum distance between galvanometer electrodes on sheet, at which the current in the galvanometer can be perceived. The galvanometer distance (cm.).

t Time (seconds).

u Potential-difference between two designated points on the sheet (volts).

x Distance along an axis of reference; or between two assigned points on the sheet (cm.).

$X = L\omega$ Effective reactance of a tested impedance (ohms).

x_1 x_2 x_3 Inferred breadthes of sheet-strips equivalent to lateral fringe wires (cm.).

Y, y Vector admittances (mhos |_).

y Distance along an axis perpendicular to the axis of reference (cm.).

$Z = R + jX$ Vector impedance under test (ohms |_).

z Distance along the sheet corresponding to an impedance Z (cm.).

Δz Minimum distance in any direction from the true balance point of z which can be detected on the galvanometer. The radius on the circle of uncertainty (cm.).

$\omega = 2\pi f$ The angular velocity of an alternating current (radians per second).

Digitized by Google

RÉSUMÉ

L'action simultanée de deux courants alternatifs de même phase, mais décalés l'un par rapport à l'autre de 90°, et qui traversent une plaque métallique, y engendre des champs rotatifs de courant électrique et de potentiel électrique expérimentalement révélés par la méthode originale inventée par Galileo Ferraris en 1889.

L'arithmétique des champs tournants électriques est développée au point de vue de l'intensité, de la sensibilité et de la précision des mesures. Divers types de diagrammes de vecteurs représentant les variations du phénomène produit expérimentalement sur la plaque y ont été suivis, et analysés sous le rapport du potentiel alternatif, du courant, de la puissance et de l'énergie cyclique dans le circuit en examen.

Les applications de la méthode ainsi que les appareils employés sont décrits aussi bien pour la mesure des courants que pour la démonstration expérimentale des vecteurs enregistrés sur les diagrammes et du phénomène du vecteur dans l'étude des courants alternatifs. On espère que quelques-uns des élèves de Galileo Ferraris reprendra cette méthode en considération et la développera comme il convient.

Digitized by Google

DISCUSSION

M. H. ARMAGNAT (Paris). — *La communication du Prof. Kennelly a une grande importance surtout au point de vue didactique, car elle nous fournit une méthode de mesure des grandeurs alternatives, méthode qui permet de voir immédiatement sur la plaque de zinc qui sert à la mesure, la représentation graphique des vecteurs. J'avais déjà noté l'originalité et l'importance de cette méthode sur la publication américaine faite par M. Kennelly il y a quelque temps, et j'ai suivi avec grand intérêt le développement complet et les applications importantes qu'il vient de nous exposer et je l'en remercie vivement.*

M. A. LARSEN (Copenhague). — *Je suis aussi de l'avis de M. Armagnat que la méthode exposée par le Prof. Kennelly donne de suite une idée claire des grandeurs que l'on mesure. En même temps je saisis l'occasion de vous rappeler mon compensateur complexe qui, quoique n'étant pas basé sur le même principe, donne deux composantes à angle droit des grandeurs que l'on mesure.*

M. H. ARMAGNAT (Paris) *reconnaît l'analogie des deux méthodes pour le but qu'elles se proposent et rappelle que la méthode de Larsen a été considérée dans l'étude de MM. Barbagelata et Emanueli.*

M. G. CAMPOS (Milan), *de la part de ses collègues Italiens, remercie vivement le Prof. Kennelly de l'hommage fait de sa lecture à Galileo Ferraris, en dérivant sa méthode très géniale de mesure, des théorèmes sur le champ rotatif.*

Digitized by Google

Contributo allo studio delle correnti vaganti.

Prof. Ing. G. Revessi (Roma)

La caduta di tensione nelle rotaie.

Le correnti di ritorno delle reti tramviarie dovevano, nella mente di coloro che all'alba della trazione elettrica pensarono di utilizzare le rotaie come uno dei due conduttori, seguire fedelmente le rotaie stesse e i canapi di collegamento coll'officina di produzione, o almeno, se anche costoro previdero che ciò non sarebbe esattamente avvenuto, non si preoccuparono degli inconvenienti, giustamente persuasi, che dopo l'attuazione pratica di un'idea geniale, l'esperienza avrebbe gradualmente insegnato a porvi riparo.

Ai fini d'un calcolo di massima, dove non interessino i dettagli quanto la considerazione sintetica dell'insieme, possiamo immaginare la zona coperta dalla rete tramviaria limitata da un cerchio coll'officina di produzione al centro, e le maglie così strette e il traffico così uniformemente distribuito da poter sostituire al reale intreccio delle rotaie una lamina metallica continua estesa su tutta la zona considerata ed investita, a rappresentare il carico, da una pioggia uniforme di filetti verticali di corrente. Naturalmente il centro della lamina, dove si innesta la barra negativa dell'officina, non può essere ridotto neppure idealmente ad un punto, perchè la resistenza radiale della lamina in vicinanza del centro tende a diventare infinita, ed infinita renderebbe quindi la caduta di tensione, perciò la lamina già limitata all'esterno da un cerchio di raggio R_e deve, per rappresentare sia pure schematicamente il vero, essere limi-

Digitized by Google

tata all'interno da un cerchio concentrico di raggio R_i, che può essere immaginato tanto più ampio, quanto è maggiore la quantità di rame impiegata per collegare alla barra negativa della officina le vicine rotaie della rete.

Indicato allora con α la densità della corrente per unità di superfice della lamina, la corrente dI che investe ciascun anello elementare della lamina stessa risulta:

$$dI = 2\pi\alpha R\,dR$$

così che la corrente I che attraversa radialmente i successivi anelli della lamina procedendo dall'esterno verso l'interno è, in corrispondenza al cerchio di raggio R,

$$I = \alpha\pi (R_e^2 - R^2).$$

Indicato d'altra parte con s lo spessore della lamina e con k la conducibilità del materiale, la resistenza dr dell'anello elementare di raggio R e di spessore radiale dR è:

$$dr = \frac{dR}{2\pi ksR}.$$

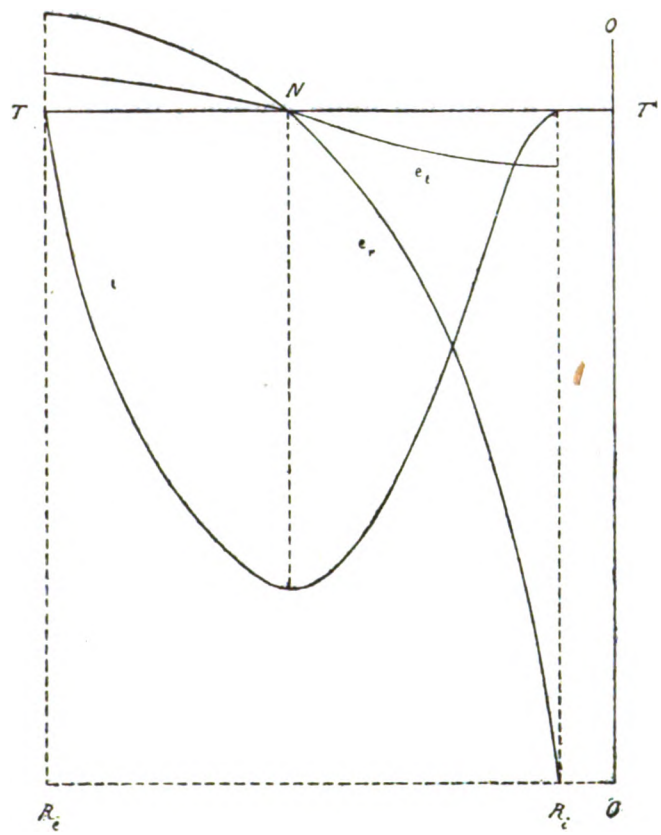
In conseguenza la caduta di tensione e_r misurata lungo un raggio qualunque della lamina, i cerchi concentrici essendo linee equipotenziali, risulta, integrando il prodotto $I dr$ fra R_e ed R_i, eguale a:

$$e_r = \frac{\alpha}{2ks}\left(R_e^2 \log n \frac{R_e}{R_i} - \frac{R_e^2 - R_i^2}{2}\right).$$

La rappresentazione grafica riportata nella figura dell'andamento dei potenziali (ordinate) in funzione del raggio dei successivi anelli della lamina (ascisse) dà naturalmente un'idea più intuitiva del fatto che non il risultato analitico ora ottenuto, e se si rammentano insieme le ipotesi premesse, che più frequentemente rispondono alla realtà che non l'ordinaria ipotesi del tronco aperto, non diramato, alimentato da un estremo e caricato uniformemente, si constata che il gradiente della caduta di tensione aumenta sempre più rapidamente coll'avvicinarsi all'officina, per la doppia ragione che aumenta la cor-

Digitized by Google

rente convogliata verso l'officina mentre diminuisce la sezione offerta dal conduttore al passaggio della corrente; ciò al punto, che nell'ipotesi che abbiamo dovuto dal principio scartare di ridurre ad un punto il raggio interno della lamina, la curva della caduta di tensione sarebbe riuscita asintotica all'asse delle ordinate.



L'ipotesi inizialmente fatta di avere la lamina isolata dal suolo escluderebbe però la formazione delle correnti vaganti, e permetterebbe anche di considerare come definitivi i risultati ora ottenuti; non sarebbe però egualmente priva di inconvenienti, perchè, indipendentemente anche dal valore assoluto della caduta di tensione totale fra la periferia e il centro della lamina, potrebbero aversi dei salti notevoli di potenziale fra la lamina stessa e il terreno, tanto più pericolosi in quanto nella realtà

Digitized by Google

non si tratta di una lamina continua, ma di una rete dove il terreno affiora ad ogni passo fra l'intreccio delle rotaie.

Non c'è però troppo da preoccuparsi di tale eventualità, che anche nel caso di qualche tronco suburbano montato in sede intieramente separata su un abbondante strato di pietrisco è estremamente raro, e che ad ogni modo, facendo generalmente capo ad un tronco di penetrazione o ad una rete urbana, non verifica la condizione del totale isolamento dal suolo.

La formazione delle correnti vaganti.

Nella pratica, limitando naturalmente le nostre considerazioni soltanto al caso delle tramvie, le cose sono diverse; le rotaie, quindi la lamina da noi considerata, non sono isolate dal suolo, nè il suolo è così isolante da dar luogo nella vicinanza della lamina a una perturbazione dei potenziali di natura soltanto elettrostatica; la lamina delle rotaie è invece elettricamente collegata al suolo in tutta la sua estensione, e le correnti di ritorno che investono la lamina non utilizzano unicamente questa per raggiungere l'officina, bensì si disperdono in parte attraverso il suolo, dando origine a quelle tali correnti impropriamente chiamate vaganti, forse dai fisici per vendetta, perchè vagando raggiungono nei rapporti del circuito, cui appartengono, un effetto doppiamente utile, elettricamente perchè diminuiscono la caduta di tensione dianzi calcolata nella lamina ed economicamente perchè in conseguenza diminuiscono la perdita di energia nella lamina stessa.

Calcoli discretamente complicati anche nell'ipotesi di un sottosuolo elettricamente omogeneo permetterebbero di seguire l'andamento dei potenziali e delle correnti nel terreno, ma si tratterebbe piuttosto d'una esercitazione teorica che di uno studio avente un reale interesse pratico, in quanto che non si sarebbe ancora tenuto conto di un altro fattore capace di sconvolgere completamente l'andamento previsto e di dare anzi ben diversa e maggiore importanza al problema delle correnti vaganti, tale fattore essendo dovuto alle masse metalliche affondate nel terreno.

A pochi decimetri infatti al di sotto della lamina delle rotaie si estende un altro complicato intreccio di conduttori metallici più o meno in diretto contatto elettrico col suolo; sono i tubi

Digitized by Google

dell'acqua, del gaz, le armature metalliche dei cavi, le armature delle costruzioni in cemento armato.

Se fondiamo insieme queste masse metalliche in una seconda lamina orizzontale, questa volta sotterranea e separata dalla lamina delle rotaie da uno strato di terreno che supporremo uniforme ed elettricamente omogeneo, abbiamo modo di prevedere con relativa semplicità di mezzi le conseguenze pratiche più importanti.

Possiamo infatti cominciare coll'ammettere che la resistenza elettrica di questa lamina sia trascurabile, con che avrà la lamina in ogni punto il medesimo potenziale, e precisamente quello del terreno laddove non giungono le perturbazioni delle correnti di ritorno; possiamo ancora supporre costante per unità di superfice della lamina la resistenza interposta fra essa e le rotaie, e possiamo trascurare finalmente le correnti vaganti orizzontalmente nel terreno: avverrà allora uno scambio di correnti fra le due lamine sempre con direzione verticale e proporzionali in ogni punto alla differenza di potenziale fra le due lamine nel punto stesso, la somma di queste correnti dovendo inoltre risultare zero. Così, nell'ipotesi dell'officina isolata dal suolo e della barra negativa congiunta alle rotaie, avremo alla periferia un passaggio di corrente dalla lamina delle rotaie alla lamina sotterranea e verso il centro un passaggio in senso contrario; il potenziale delle due lamine sarà il medesimo in corrispondenza a un cerchio neutro separante appunto le due zone, e di cui può essere nel caso in figura graficamente determinata la posizione mediante la determinazione dell'ordinata della retta di compenso della curva delle cadute di tensione, non di quella in figura però, ma di quell'altra che si otterrebbe prendendo per ascisse anzichè i raggi le aeree dei cerchi corrisponenti: tale ordinata è il potenziale del cerchio neutro rispetto al potenziale della barra negativa, e l'ascissa dell'intersezione della retta di compenso riportata in figura colla curva delle cadute di tensione misura il raggio del cerchio neutro: a questo punto le ordinate intercette fra la curva delle cadute di tensione e la retta di compenso misurano i potenziali della lamina delle rotaie rispetto al suolo.

L'andamento della corrente i che percorre allora la lamina sotterranea dalla periferia verso il centro può essere ormai facilmente determinato, e come mostra la curva in figura questa corrente cresce dalla periferia verso il cerchio neutro, dove na-

Digitized by Google

turalmente è massima, e diminuisce quindi di nuovo per tornare ad annullarsi in corrispondenza all'officina.

Diversa da quella prima calcolata sarebbe in conseguenza la corrente I che percorre radialmente la lamina delle rotaie, poichè dovrebbe andare diminuita di quella che passa invece nella lamina sotterranea, e minore risulterebbe quindi anche la caduta di tensione prima dedotta.

Si tratta però di correzioni, cui possiamo rinunziare, in quanto non alterano l'andamento caratteristico delle cadute di tensione e delle correnti, e non ci impediscono di rilevare due circostanze importantissime, che discendono immediate da quanto precede: prima di tutto in vicinanza dell'officina le tubature risultano assai più fortemente positive, per dir così, rispetto alle rotaie, che non sieno alla periferia le rotaie rispetto alle tubature; in secondo luogo, l'area intorno all'officina, in cui avviene il fatto accennato, è assai più ristretta dell'area alla periferia; basta por mente che in figura le ascisse sono i raggi della lamina e non le aeree dei cerchi. Conseguenza di queste due circostanze, del resto indissolubili, è che la densità della corrente che abbandona le tubature è assai maggiore della densità della corrente che vi giunge.

Se si confrontano questi risultati con quelli analoghi che si possono ottenere dalla considerazione d'un tronco tramviario alimentato a un estremo e uniformemente caricato, dove la zona pericolosa per le tubature si estende per $^4/_{10}$ della lunghezza totale del tronco, con una differenza di potenziale fra tubi e rotaie doppia di quella risultante all'altro estremo (1), si vede di quanto le condizioni peggiorino, quando si tenga conto nell'avvicinarsi all'officina, oltre che dell'aumento della corrente convogliata dalle rotaie, anche della diminuzione della sezione totale delle rotaie stesse verso il centro della rete.

Beninteso l'ipotesi che la lamina sotterranea abbia una resistenza trascurabile è troppo radicale per esser vera; nella realtà al passaggio radiale della corrente si oppone la resistenza della lamina stessa, e per conseguenza anche lungo il raggio della medesima si manifesta una caduta di tensione, al potenziale del terreno rimanendo soltanto ancora il cerchio neutro, che divide la lamina sotterranea in due zone distinte, nella esterna, investita dalle correnti vaganti, positiva rispetto al terreno sottostante, e nell'interna abbandonata invece dalle correnti vaganti, negativa: in conseguenza di ciò, lasciate immutate le altre

Digitized by Google

ipotesi, le correnti vaganti subiscono una nuova e più forte diminuzione, in quanto che entra in giuoco la caduta di tensione nella lamina sotterranea e diminuisce quindi fra le successive zone circolari soprastanti delle due lamine la differenza di potenziale.

In figura, per non complicare inutilmente le cose, è stato calcolato l'andamento della caduta di tensione nella lamina sotterranea e_t in base alla corrente prima determinata nella lamina stessa, una successiva approssimazione potendosi eventualmente ottenere ricalcolando l'andamento della corrente nella lamina sotterranea in base alle nuove differenze di potenziale trovate fra le zone corrispondenti delle due lamine, e rappresentate in figura dalle ordinate intercette fra le due curve dei potenziali: anche questo lavoro non metterebbe però in evidenza nulla di nuovo e quindi può essere tralasciato.

I danni delle correnti vaganti.

Infatti ci sono ormai tutti gli elementi fondamentali necessari a rendersi conto del meccanismo delle correnti vaganti, a prevederne tutti gli inconvenienti, come pure si possono ormai mettere facilmente nel giusto rilievo gli elementi che favoriscono lo sviluppo di queste correnti e confrontare i rimedi più efficaci a limitarle.

Anzitutto è evidente, che dove il ferro o ogni altro metallo funziona da anodo, cioè alla periferia della lamina delle rotaie e al centro in generale della lamina sotterranea, là si hanno, o più esattamente si possono avere, fenomeni di corrosione elettrolitica, fenomeni sui quali dovremo ritornare più avanti; è pure evidente che i forti squilibri di potenziale che per effetto delle correnti di ritorno in generale e delle correnti vaganti in particolare si manifestano fra i diversi punti del mezzo occupato dalle lamine e dal terreno, e più ancora le loro rapide inevitabili variazioni, interferiscono in maniera eventualmente insopportabile cogli impianti a correnti deboli, che utilizzino, come i telegrafi ed i telefoni, il medesimo mezzo per completare i loro circuiti; se si tien finalmente conto che non si tratta di vere lamine continue, ma di un intreccio di rotaie in superfice e di tubi e di cavi nel sottosuolo posati ed immersi rispettivamente in un terreno irregolarmente conduttore, e da questo talora

Digitized by Google

separati da uno strato più o meno isolante, si intuisce anche che, lungi dall'esser zero in ogni punto la somma della corrente di andata nel filo di lavoro e di ritorno nelle rotaie, le correnti nei fili di lavoro, quelle nelle rotaie e quelle vaganti nei tubi e nel terreno non si compensano affatto, neppure a distanza, nei loro effetti magnetici e perturbano quindi il campo magnetico terrestre, specialmente colle loro rapide variazioni, perturbando gli strumenti che questo campo magnetico misurano o che di questo campo si servono.

Le corrosioni elettrolitiche, i disturbi telegrafici e telefonici, le perturbazioni nel campo magnetico terrestre, che è mezzo nelle misure elettriche e scopo principale di studio nelle misure magnetiche, sono i tre grandi guai, che le correnti di ritorno degli impianti tramviari arrecano ai terzi.

I fattori di maggiore influenza sulle correnti vaganti.

È evidente che influenza massima sull'entità delle correnti vaganti ha innanzi tutto la caduta di tensione che si sviluppa nella lamina delle rotaie, caduta di tensione sulla quale hanno alla lor volta influenza decisiva la conducibilità k e lo spessore s della lamina; per quanto riguarda propriamente le rotaie, la qualità dell'acciaio dipende assai prima dalle necessità meccaniche che dalle convenienze elettriche e del resto la sezione delle rotaie a gola che generalmente nelle reti urbane devono usarsi è elettricamente abbondante; ma quello che in pratica influisce sfavorevolmente sulla conducibilità e sullo spessore della lamina sono i giunti elettrici, dei quali dev'essere grandemente curata l'esecuzione e, più che l'esecuzione, la buona manutenzione, per necessità di cose alquanto difficile.

Sorge allora facilmente l'idea che la riduzione della resistenza radiale della lamina delle rotaie possa anche essere ottenuta mettendo in parallelo colle rotaie dei conduttori nudi di rame; l'efficacia di questo espediente è sempre, in confronto al costo, molto limitata, seppure qualche volta non rischia di essere addirittura negativa: una rotaia d'una cinquantina di kilogrammi, quanto pesano spesso per metro quelle attuali a gola, ha già una sezione di oltre 6000 mmq., si vede quindi, anche tenuto conto dell'influenza sfavorevole dei giunti e della minore conducibilità del ferro in confronto al rame, a quali sezioni in rame

Digitized by Google

bisognerebbe ricorrere per ridurre in maniera appena sensibile la resistenza elettrica delle due rotaie di un binario: d'altra parte questi conduttori ausiliari devono necessariamente essere messi a una certa profondità nel terreno, anche per proteggerli dai furti, facili sopratutto durante lavori stradali perchè di difficile segnalazione; finiscono quindi per arrivare troppo vicini alla lamina sotterranea e ad ogni modo per facilitare la trasmissione delle correnti vaganti dalla lamina delle rotaie al terreno (2).

Parrebbe invece che questa trasmissione appunto potesse essere efficacemente impedita isolando la lamina delle rotaie dal suolo; a parte che abbiam visto non esser questo provvedimento privo di inconvenienti, esso non può essere realizzato in maniera veramente efficace neppure disponendo le rotaie su di un letto di calcestruzzo, calcestruzzo che nelle condizioni ordinarie di umidità non è isolante (3).

Per le correnti vaganti che radialmente percorrono il sottosuolo fra le due lamine null'altro si può fare; l'entità complessiva delle correnti vaganti e il pericolo delle corrosioni elettrolitiche sulla lamina sotterranea può essere però ridotto agendo sulla lamina stessa, e precisamente cercando di isolare la lamina dal suolo che la circonda e aumentando la sua resistenza radiale.

Vedremo che il primo mezzo non potendo mai essere realizzato in maniera perfetta, può bensì ridurre l'entità complessiva delle correnti vaganti, ma quanto alle azioni elettrolitiche locali, laddove i tubi son positivi, può anche riuscire dannoso aumentando la densità della corrente; di questo mezzo va però tenuto conto nel senso di non avvicinare di troppo in nessun punto le due lamine fra loro: quanto all'aumento della resistenza della lamina nel senso radiale, esso può essere realizzato interponendo fra i tubi giunti isolanti; il provvedimento è però in pratica difficile e costoso, e può anch'esso dar luogo ad inconvenienti, quando non sia sufficientemente generalizzato a tutte le condutture che hanno andamento radiale, poichè l'interposizione di qualche giunto isolante, come accidentalmente si verifica in vecchie tubature (4), può provocare corrosioni elettrolitiche sull'estremità del tubo funzionante da anodo.

Considerata la poca diffusione che hanno finora avuto i giunti isolanti, sarebbe interessante di studiare, limitatamente alle condotte d'acqua, la pratica utilizzazione delle note proprietà del-

Digitized by Google

l'anodo di alluminio, contando a produrre il desiderato fenomeno nel giunto sul velo sottilissimo d'acqua, che trapela dal giunto stesso in una condotta in pressione.

Ad evitare le corrosioni elettrolitiche sembrerebbe a prima vista anche efficace un procedimento totalmente opposto, cioè il collegamento elettrico delle due lamine in corrispondenza all'officina, e il miglioramento dal punto di vista della loro conduttanza dei giunti dei tubi, evitando così di far funzionare questi ultimi da anodo rispetto alle rotaie: disgraziatamente le correnti vaganti sarebbero enormente accresciute coll'incremento delle altre perturbazioni accennate, e non è detto che in molti luoghi le tubature non funzionerebbero egualmente da anodo sia rispetto al terreno alla periferia della lamina, sia dovunque in corrispondenza a vecchi giunti di alta resistenza.

L'influenza del raggio d'azione della centrale e il caso delle linee suburbane.

Abbiamo così passato in rivista tutti gli elementi fondamentali che modificano l'entità e gli effetti delle correnti vaganti, tralasciando però finora il raggio d'azione della centrale in rapporto alla densità del traffico, che è uno dei più importanti, poichè se questo raggio è eccessivo, i mezzi finora considerati diventano insufficenti a superare le difficoltà. Esso ha infatti influenza grandissima sulla caduta di tensione totale nella lamina delle rotaie; applicando in proposito l'espressione dedotta nella prima parte di questo lavoro, sia pure nell'ipotesi della lamina isolata, si vede che riducendo il raggio esterno della lamina alla metà, per esempio da 2000 a 1000 metri e mantenendo costante il raggio interno, per es. a 50 metri, ed invariati lasciando tutti gli altri elementi, la caduta massima di tensione si riduce a meno di $^1/_5$, mentre la stessa rimane, lasciando inalterata la qualità del terreno e la distanza fra le due lamine, la resistenza unitaria di passaggio fra le lamine stesse, e la resistenza radiale del terreno frapposto e della lamina sotterranea, che è evidentemente proporzionale al logaritmo del rapporto dei raggi esterno ed interno della lamina, non si riduce che nella ben minore proporzione da 10 ad 8 circa.

Tutto ciò è vero finchè come raggio esterno della lamina delle rotaie si intenda la distanza media dalla centrale di produzione

Digitized by Google

dalla periferia della rete propriamente detta, e non l'estrema distanza dall'officina di qualche linea suburbana, che può oltrepassare la periferia della rete anche di alcuni kilometri; questa linea esterna non modifica sensibilmente nè la posizione del cerchio neutro, nè la caduta di tensione dalla periferia della lamina al centro, e in conseguenza non modifica in maniera veramente apprezzabile nè l'area dove la lamina sotterranea funziona rispetto alle rotaie da anodo, nè la densità della corrente che abbandona la lamina stessa in questa zona: questo tronco suburbano ha quindi le rotaie sempre positive rispetto al terreno, e non danneggia le tubature che ordinariamente corrono parallele, salvo eccezionalmente nei giunti o dovunque si presenti uno sfavorevole squilibrio di potenziali fra la tubatura e il terreno. Può avere invece una notevole sfavorevole influenza sulle comunicazioni telefoniche e anche telegrafiche, e disturbare fortemente quei laboratori fisici e magnetici, che per l'appunto abbiano sperato di sottrarsi a queste noie accettando il sacrificio di allontanarsi dalle città.

A un altro effetto finalmente possono dar luogo queste linee suburbane, e le considerazioni ora svolte lo lasciano prevedere, all'effetto cioè di dar luogo, anche laddove le tubature sono negative rispetto alle rotaie, a fortissime differenze di potenziale, quali la considerazione della lamina circolare non lascerebbe supporre possibili che nelle vicinanze dell'officina e colle tubature positive rispetto alle rotaie.

Tornando al caso della rete compatta, l'andamento della caduta di tensione nei pressi dell'officina, quale risulta nel diagramma dapprima determinato, mostra come anche con raggi d'azione relativamente piccoli possano aversi nei dintorni della officina squilibri di potenziale singolarmente elevati e pericolosi per l'integrità della lamina sotterranea, e ciò ogni qual volta non sia sufficentemente ampio il raggio interno della lamina delle rotaie, vale a dire non sia largamente provveduto al collegamento elettrico delle rotaie in vicinanza dell'officina colla barra negativa; evidentemente tale inconveniente si può meglio eliminare, anzichè riducendo la caduta di tensione in quell'ultimo tratto mediante forti sezioni di rame nudo, eliminando la influenza sulle correnti vaganti di tale ultima caduta di tensione mercè l'impiego di cavi isolati, come è stato del resto tacitamente supposto nel tracciare al principio il diagramma delle cadute di tensione; l'impiego del rame necessario può allora

Digitized by Google

essere scelto principalmente in base a considerazioni economiche.

Il caso delle reti molto estese.

In caso di reti molto estese il primo pensiero che si presenta è quello di aumentare il numero delle centrali, foggiandole, per esempio, a centrali convertitrici alimentate da un impianto trifasico con una rete ad alta tensione, ma il sistema può essere economicamente conveniente soltanto nel caso di reti grandissime con un traffico molto intenso, caso che va diventando raro, malgrado il fenomeno dell'urbanesimo, in quanto ragioni piuttosto sociali che economiche o tecniche conducono in molti centri a sovrapporre sulla medesima zona impianti tramviari indipendenti ed esercitati da enti diversi.

Fortunatamente la limitazione della caduta di tensione nella lamina delle rotaie può in questi casi essere ottenuta in altri modi; un primo modo teoricamente perfetto, ma assai raramente applicato (5), consiste nello stendere l'una accanto all'altra due reti di fili di lavoro eguali in modo che il carico riesca uniformemente diviso fra le due reti, come sarebbe relativamente facile di conseguire per un impianto pianeggiante e tutto a doppio binario; basterebbe allora foggiare il sistema di distribuzione a tre fili, collegando i due morsetti estremi dell'officina generatrice coi due sistemi di fili aerei e il morsetto di mezzo colle rotaie; con un esercizio regolare la corrente nelle rotaie sarebbe nel suo complesso assai prossima a zero e il potenziale delle rotaie sarebbe praticamente da per tutto lo stesso.

Disgraziatamente il sistema è di difficile applicazione per l'appunto in quei casi di reti vaste e complicate dove potrebbe rendere i migliori servigi, prima perchè non tutte le linee d'una rete possono essere a doppio binario, e poi perchè due reti aeree di lavoro a oltre 1000 volt di differenza di potenziale riservano sempre delle difficoltà e dei fastidi, specie in corrispondenza agli inevitabili incroci delle due reti, incroci che il passaggio dell'archetto o della rotella esige veramente a livello; anzi, senza questa seconda obbiezione cadrebbe in parte anche la prima, perchè sarebbe sempre possibile disporre anche sulle eventuali linee a un solo binario due fili di lavoro, uno dell'un sistema e l'altro dell'altro, e alimentare col primo una vettura, col secondo la successiva.

Digitized by Google

Un altro sistema di assai più facile applicazione, sebbene praticamente non altrettanto efficace, consiste invece nel mantenere al medesimo potenziale un certo numero di punti razionalmente scelti sulla lamina, evitando sulla lamina stessa la presenza di ogni altro punto a potenziale inferiore; mediante questi centri di alimentazione l'intera lamina resta allora divisa in tante lamine più piccole , e quindi con caduta di tensione massima, fra la periferia di ciascuna lamina e il proprio centro di alimentazione ridotta in assai maggior misura, così come si riducono le cadute di tensione nei distributori d'una rete per luce mediante l'impiego d'un numero conveniente di appositi alimentatori: naturale necessità del sistema, oltre l'impiego di canapi isolati anche per il ritorno delle correnti, è quella di frapporre fra la barra negativa dell'officina e le rotaie più vicine una resistenza addizionale che riconduca anche il centro della lamina al potenziale dei centri di alimentazione, e di resistenze addizionali, in parte anche variabili per far fronte agli effetti dello spostamento del carico, devono in genere essere provveduti tutti gli alimentatori per mantenere costante il potenziale dei loro estremi.

Isolato dal suolo tutto il sistema a partire dai centri di alimentazione, la caduta di tensione negli alimentatori non ha influenza sulle correnti vaganti, e quindi può essere calcolata, e con lei la sezione dei canapi, in base al criterio della minima spesa.

Considerazioni economiche possono indurre a raggiungere lo stesso scopo in altro modo, possono cioè consigliare di introdurre in ciascun cavo di ritorno una piccola dinamo ausiliaria, la quale compensando la caduta di tensione nei cavi riporti costantemente i centri di alimentazione al potenziale della barra negativa dell'officina; ciò può essere ottenuto nel miglior modo facendo corrispondere a ciascun alimentatore di andata, o anche a ciascun gruppo di questi, un cavo di ritorno, e eccitando ciascuna dinamo, mantenuta a velocità costante, colla corrispondente corrente di andata, la semplice eccitazione in serie sul cavo medesimo di ritorno potendo facilmente invece dar luogo a forti richiami di corrente da un centro di alimentazione ad un altro.

È opportuno notare che l'impiego di queste dinamo addizionali non rappresenta in realtà che un'ingegnosa modificazione del sistema a tre fili dianzi accennato, colla differenza che le

Digitized by Google

due sezioni invece di essere eguali ed egualmente caricate, sono diverse; l'una, a 500 volt, copre le perdite nei circuiti di andata e provvede alla tensione di utilizzazione, l'altra, diciamo a 30 volt, copre soltanto le cadute di tensione nei cavi di ritorno.

Le considerazioni svolte in precedenza sull'andamento dei potenziali in vicinanza della centrale, o, ciò che è lo stesso, in vicinanza dei centri di alimentazione, mostrano con quanta cura e larghezza debba essere provveduto all'innesto dei cavi di ritorno colle rotaie, evitando beninteso che in contatto metallico delle rotaie stesse giunga anche l'armatura metallica dei cavi.

Lo svolgimento storico della questione attraverso la letteratura tecnica.

Se si dà ora una corsa alla letteratura si va incontro a una constatazione singolare, si constata cioè che i concetti fondamentali ora dedotti in forma sintetica e originale appaiono accennati qua e là fino dai primi tempi della trazione elettrica tramviaria: subito dopo la prima constatazione di corrosioni elettrolitiche dovute alle correnti vaganti, e riscontrate a Boston nel 1891 sull'armatura di cavi telefonici, si consigliò di collegare colle rotaie piuttosto il polo negativo delle dinamo generatrici per ridurre intorno all'officina l'area pericolosa ai tubi, e si proposero diversi espedienti per rimediare agli inconvenienti accertati (6); nel 1895 Kapp proponeva e brevettava l'inserzione delle sue dinamo ausiliarie dianzi accennate sugli alimentatori (7), dinamo già proposte, sebbene in una forma un po' diversa, da E. Thomson un anno prima (8), e Kapp stesso, Rasch (9), Ritterhaussen (10), Natalis (11), Parshall, Cardew, Trotter (12), Kallmann (13), tutti prima del 1900, mettevano in evidenza la irrazionalità dei cavi nudi, e l'alta importanza dei giunti conduttori alle rotaie e dei giunti isolanti alle tubature.

Nel 1900 appunto Teichmüller rilevava la grande convenienza teorica del sistema a tre fili (14).

Malgrado ciò, ancora nel 1905 in Germania, dove pur funzionava fin dal 1897 una Commissione per le correnti vaganti, la Erdstromkommission (15), risultava che poche erano le reti tramviarie le cui condutture di ritorno soddisfacessero a criteri razionali (16), e noi sappiamo anche in Italia di reti relativamente recenti, dove pure furono affogate nel terreno enormi

Digitized by Google

quantità di rame nudo, e presso le quali i giunti non sono stati sempre mantenuti nella maniera più attenta.

Ancora nel 1907 la citata Commissione delle correnti di terra constatava in più d'una città tedesca insufficienza nei circuiti di ritorno delle tramvie e danni nei tubi (17).

Anche in America dalle statistiche riportate dal Sever al Congresso di St. Louis risulta che non tutte le reti americane rispondevano ancora in quell'epoca a questi concetti (18).

Nell'ultimo decennio studi teorici importanti sono stati fatti dall'Ulbricht (19) e dal Michalke (20), il quale ultimo ha anche pubblicato nel 1904 un interessante volumetto su quanto riguarda le correnti vaganti (21).

Ciò non toglie che a modificazione e qualche volta in contrasto dei criteri fondamentali, che dagli studi precedenti derivano, non sieno state fatte anche altre proposte: così si è più volte pensato non solo di portare le tubature al potenziale della barra negativa, ma di portarle addirittura a un potenziale più basso mediante l'impiego d'una forza elettromotrice ausiliaria; a un concetto simile si inspira la proposta del Brown del 95 (22), e quella recentissima applicata dal Geppert a Karlsruhe (23).

Un altro rimedio agli effetti delle correnti vaganti, almeno per quanto riguarda gli effetti elettrolitici, fu creduto di riconoscere nell'inversione periodica delle barre dell'officina rispetto ai circuiti aerei e di ritorno dalla rete (24), espediente invece che per fenomeni elettrochimici Bergius e Krassa hanno dimostrato essere in qualche caso perfino dannoso, finchè almeno non si tratti delle rapide inversioni d'una vera corrente alternata industriale (25).

Si è insomma sempre tentennato nel discutere delle cause e dei rimedi delle correnti vaganti, mentre le linee fondamentali del problema erano state messe da alcuni autori fin dal principio nel giusto rilievo.

Le ricerche sperimentali.

Passando dal campo teorico al campo sperimentale, le ricerche sono state bene altrimenti numerose e sempre ricche di utili insegnamenti.

Per quanto riguarda le perturbazioni ai gabinetti di fisica Meyer e Mützel si occuparono del problema già nel 94 (26), una comu-

Digitized by Google

nicazione fu fatta nel 99 dal prof. Blaserna al Congresso di Como (27), un'altra fu fatta l'anno successivo da Bezold (28), accompagnata dai risultati di interessanti ricerche sperimentali dell'Edler (29); le misure magnetometriche sono perturbate dalle tramvie a molti kilometri di distanza.

Delle perturbazioni al funzionamento degli apparecchi telegrafici e telefonici si sono ancora occupati nel 94 Meyer e Mützel (30), Du Riche Preller nel 96 (31), e con speciale riguardo alla trasmissione telegrafica sottomarina Trotter (32) e Jamieson (33), e con loro altri ancora che il ricordare porterebbe troppo in lungo: una differenza di potenziale dell'ordine dei 10 volt può mettere in azione la suoneria del telefono; oscillazioni enormemente più piccole, quali quelle prodotte dal passaggio sotto le spazzole delle lamelle del collettore, sono facilmente avvertite dal ricevitore telefonico; per abbonati posti alla periferia o peggio ancora lungo le linee tramviarie suburbane unico rimedio pratico, utile del resto in generale al buon funzionamento dell'impianto, è il doppio filo.

Le ricerche più numerose riguardano la determinazione dei potenziali e quella delle correnti nonchè lo studio delle azioni elettrolitiche.

Generalmente noti sono gli apparecchi per il controllo della resistenza dei giunti delle rotaie, fondati sull'impiego della corrente stessa di ritorno e sul confronto della resistenza del giunto con quella d'un tratto dell'attigua rotaia (34).

Circa alla misura dei potenziali, quando si è trattato di determinare il loro andamento nella lamina delle rotaie si è generalmente fatto ricorso a speciali fili piloti, che in alcune reti tramviarie razionalmente costruite ed esercitate ricollegano anzi permanentemente l'officina ad opportuni punti della rete, e che sono stati recentemente raccomandati anche in occasione dell'ultimo regolamento emesso in Germania dalla Commissione delle correnti di terra (35); in qualche caso si sono adoprati anche a questo scopo dei fili telefonici (36), che possono poi, come vedremo, più facilmente servire per la determinazione dei potenziali nella lamina sotterranea. Nessuna difficoltà poi offre, eccetto qualche volta quella d'una lettura media attraverso le rapide variazioni, la determinazione della differenza di potenziale fra punti corrispondenti della lamina delle rotaie e della lamina dei tubi.

La considerazione che l'influenza elettrica di un conduttore

Digitized by Google

immerso in un suolo cattivo conduttore sotto un potenziale diverso da quello del suolo stesso decresce molto rapidamente colla distanza (37), mentre d'altra parte in un terreno buon conduttore possono le forze elettromotrici di polarizzazione nelle due superfici di contatto non compensarsi, aveva indotto nei primi anni di questo decennio a considerare piuttosto che la differenza di potenziale esistente fra i diversi punti delle lamine, le corrispondenti differenze di potenziale fra punti presi nel terreno a una decina di centimetri di distanza dalle lamine stesse, tali ultime differenze potendo più agevolmente permettere delle illazioni sulla presenza o meno di correnti vaganti (38), e siccome in questo caso le misure avrebbero potuto facilmente essere falsate dalla polarizzazione dei contatti metallici adoperati per eseguire la misura stessa, così Haber e Goldschmidt proposero i loro elettrodi impolarizzabili utilizzanti la nota proprietà dello zinco immerso in una soluzione di solfato di zinco (39); tali elettrodi sono però di natura troppo delicata per misure che devono esser fatte sulla pubblica via, e la stessa Commissione delle correnti di ritorno ha, nelle ricerche eseguite nel 1909 a Düsseldorf, tralasciato il loro impiego, del quale più non si parla neanche nell'ultima edizione del regolamento redatto a cura appunto dell'accennata Commissione (40).

Di un nuovo metodo per la determinazione dell'andamento dei potenziali.

La lista delle ricerche sperimentali è ancora lungi dall'esser terminata, ma prima di completarla dobbiamo accennare, relativamente alla misura dei potenziali, al procedimento da noi adottato in ricerche sperimentali sulle correnti vaganti eseguite in Roma, dove abbiamo ritenuto utile di procurarci anzitutto il completo andamento dei potenziali sia nella lamina sotterranea che nelle rotaie e nel loro confronto.

In realtà anzi, almeno per quanto riguarda la lamina sotterranea, i metodi adoperati furono due, affinchè potessero servire di reciproco controllo nei risultati.

Verificato sperimentalmente che i potenziali dei diversi elementi, che compongono la lamina sotterranea, sono in ciascun punto praticamente i medesimi, anche se si tratta di elementi che potrebbero essere elettricamente separati, come i tubi del-

Digitized by Google

l'acqua e quelli del gaz, verifica del resto già fatta anche dall'Ulbricht (41), abbiamo disposto un millivoltometro di precisione, munito di un commutatore opportuno, presso il permutatore della centrale telefonica urbana, e col gentile concorso di quei funzionari abbiamo successivamente inserito l'apparecchio di misura tra la terra della centrale e le terre degli abbonati allacciati con un solo filo; per ogni stazione l'inserzione successiva di resistenze addizionali diverse permetteva di dedurre dalle letture fatte al voltometro la differenza di potenziale realmente esistente fra le due terre. Questo metodo, eccetto in qualche caso, per l'eccessiva oscillazione della grandezza da determinare, o per l'assenza d'una buona terra presso l'abbonato, o per difetto d'isolamento della linea, o per l'impazienza dell'abbonato in attesa d'una risposta alle sue chiamate, ha condotto a risultati plausibili, ma in generale meno soddisfacenti di quelli ottenuti col secondo metodo adoperato.

Quest'altro metodo può, con un titolo che ne spiega l'essenza, esser chiamato " La livellazione elettrica dei fanali dell'illuminazione a gaz „; predisposto cioè sulla pianta della città un percorso chiuso, questo veniva seguito nelle ore di massimo traffico tramviario da una squadra costituita da un osservatore e da un paio di aiutanti incaricati di realizzare, mediante un canapetto isolato lungo qualche dozzina di metri e delle punte metalliche affidate a dei bastoni, l'inserzione del solito millivoltometro di precisione fra due fanali successivi dell'illuminazione a gaz, talora un leggero colpo di lima provvedendo ad assicurare il perfetto contatto della punta metallica col fanale attraverso la vernice.

La automatica compensazione delle oscillazioni della caduta di tensione era, alla chiusura del circuito, in generale percentualmente così soddisfacente, che ben di rado fu necessario ribattere nuovamente il circuito per eliminare incertezze.

Abbiamo così avuto modo di determinare il completo andamento dei potenziali nella lamina sotterranea, e di disseminare per la città un grandissimo numero di punti di riferimento, che hanno successivamente servito, con semplici misure di differenze di potenziale fra i fanali e le rotaie, a riferire a questa lamina i potenziali della lamina delle rotaie, ottenendo quindi anche per questa la completa loro rappresentazione: questi punti di riferimento potranno in avvenire, ribattendo col medesimo metodo gli stessi percorsi, servire a determinare le modificazioni

Digitized by Google

nell'andamento dei potenziali nelle due lamine derivanti dalle modificazioni, che eventualmente subentrassero nel traffico e nella struttura della rete tramviaria.

Abbiamo così anche ottenuto la conferma sperimentale dell'andamento dei potenziali nelle due lamine teoricamente precisato al principio di questo lavoro, specialmente per quanto riguarda la zona adiacente all'officina, e l'influenza dei tronchi suburbani.

La determinazione sperimentale delle correnti vaganti e dei loro effetti elettrolitici.

Ma è evidente che, per quanto esattamente determinato, l'andamento dei potenziali non basta a decidere dell'importanza delle correnti vaganti, potendosi teoricamente avere, come discende subito dai diagrammi ottenuti in principio, correnti vaganti praticamente trascurabili anche con forti cadute di tensione nella lamina delle rotaie, sia con forti differenze di potenziale fra le due lamine, se il terreno interposto è cattivo conduttore e la lamina sotterranea elettricamente continua, sia con piccole differenze di potenziale fra le due lamine e forte cadute di tensione anche nella lamina dei tubi, se la lamina sotterranea è costituita da tubature con giunti fortemente isolanti, mentre d'altra parte non è escluso che si possa avere funzionamento anodico dei tubi, con conseguente pericolo di corrosioni, anche laddove i tubi stessi, pure essendo negativi rispetto alle rotaie, son positivi rispetto a qualche parte di terreno intorno, e non è neppure escluso, che, anche all'infuori delle correnti tramviarie di ritorno, non si possano avere differenze di potenziale e correnti e perfino corrosioni per azioni locali, come quelle che si possono manifestare fra tubi di ferro (anodo) e tubi di ghisa (catodo) posti in vicinanza reciproca (42).

Perciò molti autori si sono preoccupati della misura diretta delle correnti vaganti, come anche della densità delle correnti che abbandonano i tubi: così Claude in un interessante lavoro presentato al Congresso di Parigi nel 1900 (43); Larsen e Faber, che hanno determinato l'entità delle correnti vaganti in un tronco aperto di 1200 metri, constatando, malgrado i giunti elettrici fossero in perfetto stato, una dispersione del 15 % (44); Krohn che ha egualmente tentato la misura diretta delle cor-

Digitized by Google

renti che percorrono i tubi (45): un amperometro, trasformabile anche facilmente in amperorametro, destinato a misurare la densità di corrente media che esce dai tubi hanno proposto ed applicato Haber e Goldschmidt (46).

Disgraziatamente tutti i metodi proposti per la misura della corrente nei tubi vanno incontro a grosse obbiezioni, così che non dànno risultati incontrovertibili; lo stesso amperometro di terra di Haber e Goldschmidt ora accennato modifica, a confessione degli stessi autori, le condizioni del mezzo in cui si deve fare la misura.

Noi in proposito, pur rinunziando all'impolarizzabilità, abbiam tentato un altro processo, abbiamo cioè messo a nudo la superfice metallica del tubo in esame, e vi abbiamo compresso accuratamente sopra una laminetta di piombo proteggendone i margini con dello chatterton; staccata dopo qualche mese la lamina e liberata chimicamente dagli ossidi, essa può dare un'idea colla sua diminuzione di peso della densità della corrente uscita dal tubo.

Ma a questo metodo, come anche all'amperometro di terra di Haber e Goldschmidt, può farsi un'altra obbiezione fondamentale: molti hanno studiato il meccanismo elettro-chimico della corrosione elettrolitica delle tubature a cominciare da Fleming (47) per proseguire con Wynkoop (48), Blake (49), Maury (50), Larsen, che ha trovato che la corrosione è di circa un grammo per amperora tanto per il ferro che per la ghisa (51), Haber e Goldschmidt (52), e tutti dal più al meno hanno messo in rilievo la estrema irregolarità colla quale la corrosione e quindi la densità della corrente si distribuisce alla superfice anodica dei tubi, e noi stessi possiamo per personale esperienza intieramente confermarlo; il tubo, lo stesso avviene anche per le lamine di piombo a cui prima abbiamo accennato, si presenta come macchiato dalle corrosioni, come si presentassero, per la natura non omogenea del terreno e del metallo, per il diverso comportamento da punto a punto della superfice di separazione, per la discontinuità degli strati isolanti eventualmente interposti, delle linee di minor resistenza attraverso le quali la densità diventa enormemente più elevata di quella media accusata dalle misure dirette, e perciò enormemente più pericolosa.

È anzi forse appunto per questa ragione, che i rivestimenti isolanti dei tubi, difficilmente potendo essere o rimanere continui, possono bensì avere influenza a diminuire il valore com-

Digitized by Google

plessivo delle correnti vaganti, ma concentrando i filetti di corrente nelle piccole zone dove la continuità dello strato isolante è interrotta, possono rendere più rapide e quindi più pericolose le corrosioni, di quello che i calcoli, come per esempio le tabelle del Michalke, lascerebbero prevedere (53): una ragione analoga fa sì che, come appunto mostrano le citate tabelle, i tubi sottili, che sono in generale di piombo, sono più esposti alle corrosioni dei grossi tubi di ghisa.

I tubi soggetti a corrosione si manifestano irregolarmente coperti da chiazze di ruggine e da cavità ripiene d'una pasta friabile, con visibili tracce, per i tubi di ghisa, di grafite; quest'ultimo fenomeno, che a prima vista può destare sorpresa, dato il contenuto di carbone nella ghisa dei tubi, è stato anche osservato da Blake (54) e da Larsen, il quale ultimo ha constatato che la resistenza specifica delle tubature in ghisa, appunto forse per il contenuto di carbonio relativamente elevato, discende quasi a quella del mercurio (55).

Se si considera finalmente che ci possono essere dei casi, in cui il tubo, pure funzionando da anodo, non è corroso, e ciò, come hanno dimostrato Haber e Goldschmidt (56), per sfavorevoli condizioni di diffusione del terreno, che non permettono al ferro di diventare chimicamente attivo, a maggior ragione si deve dire, che la misura della densità media della corrente che esce dai tubi non permette ancora di decidere sull'entità del pericolo di future corrosioni.

Le norme di protezione contro le correnti vaganti e i criteri di stima del pericolo di corrosioni elettrolitiche.

Da quanto precede discende evidente quanto sia difficile lo stabilire norme di protezione efficaci in ogni caso a garantire da corrosioni elettrolitiche le tubature, e ciò beninteso senza caricare d'una spesa eccessiva l'azienda tramviaria che le può causare, e il dettare criteri atti a stabilire *a priori* l'entità del pericolo.

Ciò non toglie che norme generali, stabilite dallo Stato, come in Inghilterra, o meglio, come in Germania, da Commissioni miste formate dagli interessati, non abbiano grande utilità pratica per costringere le aziende tramviarie a non trascurare con danno dei terzi le loro reti di ritorno.

Digitized by Google

In Inghilterra è appunto il " Board of Trade „ che fino dal 1894 si è occupato di queste prescrizioni (57), mentre in Germania se ne occupa la già accennata Commissione delle correnti di terra formata da rappresentanti del " Deutsche Verein von Gaz- und Wasserfachmänner „, del " Verband Deutscher Elektrotechniker „ e del " Verein Deutscher Strassenbahn- und Kleinbahn- Verwaltungen „, la quale ha recentemente pubblicato una nuova edizione delle sue norme (58), che sostanzialmente modifica quella precedente del 1903 (59), accettando fra l'altro la razionale distinzione di reti compatte e di linee suburbane.

Questi regolamenti stabiliscono determinate norme di esecuzione dei circuiti di ritorno degli impianti tramviari, in modo da soddisfare nell'esercizio a determinate condizioni, ed è interessante vedere come queste restrizioni sieno diventate in proposito sempre più razionali e più severe in dipendenza della maggiore esperienza che attorno al problema delle correnti vaganti si è andata accumulando: così mentre nelle norme inglesi del 94 si ammetteva per la caduta di tensione nelle rotaie un limite superiore di 7 volt, questo limite nelle ultime norme tedesche è ridotto, entro i confini della rete propriamente detta, a 2,5 volt soltanto, concedendosi poi per le linee suburbane una caduta di tensione massima di un volt per kilometro; mentre nelle accennate norme inglesi era tollerata tra rotaie e tubi una differenza di circa 4,5 volt colle rotaie positive e di circa 1,5 volt colle rotaie negative, questo limite massimo era grandemente diminuito nelle norme tedesche del 1903, nell'ultima edizione essendosi invece sostituito questo criterio con l'altro della densità massima di corrente che può abbandonare i tubi quando funzionano da anodo, pari a 0,75 milliampere per dmq.

Utili sono poi ancora queste norme per i controlli periodici e permanenti, che esse prescrivono all'esercente, sia che esse riguardino, come nelle norme inglesi, la misura delle correnti vaganti nella loro complessiva entità, sia che riguardino, come le norme tedesche, il controllo, eventualmente mediante l'installazione di opportuni fili piloti, della caduta di tensione nella rete delle rotaie.

È a questo punto opportuno di ricordare che per la sorveglianza delle correnti vaganti ha Kohlrausch, per il caso delle grandi reti, ideato fino dal 1906 un sistema molto ingegnoso (60), del controllo delle correnti vaganti essendosi occupato a suo tempo anche Kallmann (61).

Digitized by Google

Se norme come quelle precedentemente accennate, che sono il frutto di così vasta esperienza, non sono sempre sufficienti a garantire in maniera assoluta le tubature dalle insidie delle correnti vaganti, si può immaginare quanto sia difficile a stabilire all'atto pratico, se una rete di tubature corra per effetto delle correnti vaganti un serio pericolo; ma se non bastano ad affermarlo in maniera incontrovertibile le misure di potenziale di cui abbiamo trattato in questo lavoro, e neppure le misure di corrente, pur tanto disagevoli ed imprecise, resta però il fatto che le misure di potenziale intese a stabilire l'andamento della caduta di tensione nelle due lamine e le relative differenze di potenziale fra le lamine stesse, sono praticamente sufficienti a determinare le zone in cui le tubature possono correre pericolo, e dove quindi le tubature vanno attentamente sorvegliate; chè se in seguito a questa sorveglianza risultano le caratteristiche corrosioni, non c'è praticamente dubbio che esse siano dovute all'azione delle correnti vaganti, la cui presenza può ad ogni modo esser messa in evidenza con uno dei modi accennati, anche se esso non possa condurre ad una vera e propria misura.

L'azione delle correnti vaganti sul cemento armato.

Che l'importanza di un vigile controllo sulle correnti vaganti si faccia sempre più necessaria deriva non solo dall'aumento della grandezza e del traffico delle reti tramviarie, tanto più pericoloso in quanto generalmente si tratta di successive estensioni, ma anche dall'aumento dell'entità e degli uffici delle masse metalliche affondate nel terreno a costituire quella che noi abbiamo chiamato la lamina sotterranea.

Non si tratta più soltanto infatti di danneggiare qua e là le condutture dell'acqua e del gaz, col pericolo di produrre qualche fuga improvvisa, colla probabile conseguenza di una perdita complessiva di gaz nella distribuzione maggiore di quella che avrebbe luogo senza la lenta azione delle correnti vaganti, colla eventualità di qualche esplosione nei cunicoli del sottosuolo o anche soltanto dell'avvelenamento di qualche albero lungo le strade (62); ma, oltre al danno cui possono esser soggette le reti telefoniche e quelle per distribuzione di energia elettrica sulle armature dei loro cavi sempre in aumento, non van di-

Digitized by Google

menticate le costruzioni in cemento armato, anch'esse in continuo aumento nei centri urbani.

Molti autori, riprendendo gli studi iniziati dal Lindeck nel 96 sulla conducibilità del calcestruzzo (63), si sono incominciati a preoccupare di quello che avviene, sotto l'azione delle correnti vaganti, dell'armatura di ferro delle costruzioni in cemento armato: tra gli altri Knudsen (64), Shaffer (65) e affatto recentemente Magnusson e Smith (66); il risultato importantissimo di queste ricerche è che il ferro, laddove funziona da anodo, si ossida malgrado il rivestimento di cemento, e forse in conseguenza dell'aumento di volume che ne consegue spezza il rivestimento, compromettendo quindi irrimediabilmente l'integrità del sistema e la solidità della costruzione; anche in questo caso nessun rivestimento isolante del ferro, che non annulli contemporaneamente l'intima unione meccanica del ferro col cemento, è risultato sicuramente efficace.

Il pericolo, che queste esperienze di laboratorio adombrano, e che può minacciare sopratutto le fondazioni delle costruzioni in cemento armato, è tanto più grave, in quanto, accertato il danno, ogni rimedio può ritenersi tardivo.

Quanto abbiamo esposto mostra lo stato attuale del problema delle correnti vaganti, la convenienza di disciplinare l'esecuzione dei circuiti di ritorno delle reti tramviarie alle quali queste correnti sono dovute, e la necessità di sottoporle a una sorveglianza vigile e continua.

Digitized by Google

(1) MICHALKE, *Die vagabundirenden Ströme elektrischer Bahnen*. Braunschweig, 1904, pag. 16. — V. a. REVESSI, " An. Soc. Ing. Arch. It. „, vol. XXVI, 1911, pag. 341.
(2) KAPP, " E. T. Z. „, vol. XVII, 1896, pag. 43.
(3) LINDECK, " E. T. Z. „, vol. XVII, 1896, pag. 180.
(4) MENG, " E. T. Z. „, vol. XXII, 1901, pag. 354.
(5) SCHOLTES, " E. T. Z. „, vol. XXVI, 1905, pag. 483.
(6) FARHAM, " E. T. Z. „, vol. XV, 1894, pag. 404.
(7) KAPP, l. c. — V. a. " E. T. Z. „, vol. XXIII, 1902, pag. 19.
(8) RASCH, " E. T. Z. „, vol. XVII, 1896, pag. 34.
(9) RASCH, " E. T. Z. „, vol. XXVI, 1895, pag. 198.
(10) RITTERHAUSSEN, " E. T. Z. „, vol. XVII, 1896, pag. 274.
(11) NATALIS, " E. T. Z. „, vol. XIX, 1898, pag. 168.
(12) PARSHALL, " E. T. Z. „, vol. XIX, 1898, pag. 310.
(13) KALLMANN, " E. T. Z. „, vol. XX, 1899, pag. 163.
(14) TEICHMÜLLER, " E. T. Z. „, vol. XXI, 1900, pag. 436.
(15) WEST, " E. T. Z. „, vol. XX, 1899, pag. 793.
(16) TEICHMÜLLER, " E. T. Z. „, vol. XXVI, 1905, pag. 291.
(17) LINDLEY, " Jour. f. Gazb. „, vol. L, 1907, pag. 661.
(18) SEVER, " Tr. of El. Con. of St. Louis „, 1904, vol. III, pag. 666.
(19) ULBRICHT, " E. T. Z. „, vol. XXIII, 1902, pag. 212 e 720.
(20) MICHALKE, " E. T. Z. „, vol. XXIX, 1908, pag. 741. — V. a. " Arch. d. Math. „, s. III, vol. XII, 1908, pag. 51.
(21) MICHALKE, *Die vagabundirenden Ströme*, etc.
(22) BROWN, " E. T. Z. „, vol. XVI, 1895, pag. 293.
(23) GEPPERT, " Jour. f. Gazb. „, vol. LIII, 1910, pag. 953.
(24) LARSEN, " E. T. Z. „, vol. XXIII, 1902, pag. 868. — V. a. MÖRCK. " E. T. Z. „, vol. XXIII, 1902, pag. 1069.
(25) BERGIUS e KRASSA, " Jour. f. Elch. „, vol. XV, 1909, pag. 712.
(26) MEYER e MÜTZEL, " E. T. Z. „, vol. XV, 1894, pag. 33.
(27) BLASERNA, " A. A. E. I. „, vol. III, 1899, pag. 94.
(28) BEZOLD, " E. T. Z. „, vol. XXI, 1900, pag. 161.
(29) EDLER, " E. T. Z., „, vol. XXI, 1900, pag. 193. — V. a. " The El. „, vol. XLVI, 1900, pag. 392.
(30) MEYER e MÜTZEL, " E. T. Z. „, vol. XV, 1894, pag. 272.
(31) DU RICHE PRELLER, " The El. „, vol. XXXVI, 1896, pag. 338.
(32) TROTTER, " E. T. Z. „, vol. XVIII, 1897, pag. 557.
(33) JAMIESON, " The El. „, vol. XLIV, 1900, pag. 661.
(34) " E. T. Z. „, vol. XXI, 1900, pag. 796 e 986. — V. a. " E. T. Z. „, vol. XXII, 1901, pag. 84; " The El. „, vol. LV, 1905, pag. 514.
(35) BESIG ed altri, " E. T. Z. „, vol. XXXII, 1911, pag. 511. — V. a. " A. A. E. I. „, vol. XV, 1911, pag. 617.
(36) ULBRICHT, l. c.
(37) " El. Rev. „, 1909, pag. 577.
(38) " E. T. Z. „, vol. XXIV, 1903, pag. 689.
(39) HABER e GOLDSCHMIDT, " Z. f. Elch. „, vol. XII, 1906, pag. 49.

Digitized by Google

(40) " E. T. Z. „, vol. XXXI, 1910, pag. 491.
(41) ULBRICHT, l. c.
(42) HABER e KRASSA, " Z. f. Elch. „, vol. XV, 1909, pag. 705. — V. a. BURGESS, " E. T. Z. „, vol. XXIX, 1908, pag. 965.
(43) CLAUDE, *Cos. d'Él.* Paris, 1900, pag. 154. — V. a. " E. T. Z. „, vol. XXIII, 1902, pag. 68.
(44) LARSEN e FABER, " E. T. Z. „, vol. XXII, 1901, pag. 1038. — V. a. " The El. „, vol. XLV, 1900, pag. 525.
(45) KROHN, " E. T. Z. „, vol. XXII, 1901, pag. 269.
(46) HABER e GOLDSCHMIDT, l. c. — V. a. MICHALKE, " El. Krb. u. B. „, vol. VII, 1909, pag. 226.
(47) FLEMING, " The El. „, vol. XLI, 1898, pag. 689.
(48) WYNKOOP, " E. T. Z. „, vol. XX, 1899, pag. 861.
(49) BLAKE, " El. World „, dicem. 1899.
(50) MAURY, " The El. „, vol. XLV, 1900, pag. 812.
(51) LARSEN, " E. T. Z. „, vol. XXIII, 1902, pag. 841.
(52) HABER e GOLDSCHMIDT, l. c.
(53) MICHALKE, " E. T. Z. „, vol. XXIX, l. c.
(54) BLAKE, l. c.
(55) LARSEN, l. c.
(56) HABER e GOLDSCHMIDT, l. c.
(57) " E. T. Z. „, vol. XV, 1894, pag. 625.
(58) " E. T. Z. „, vol. XXXI, 1910, pag. 491. — V. a. BESIG ed altri, l. c.
(59) " E. T. Z. „, vol. XXIV, 1903, pag. 689.
(60) KOHLRAUSCH, " E. T. Z. „, vol. XXVII, 1906, pag. 585.
(61) KALLMANN, l. c.
(62) KOHLRAUSCH, l. c.
(63) LINDECK, l. c.
(64) KNUDSEN, " The El. „, vol. LIX, 1907, pag. 213.
(65) SHAFFER, " E. T. Z. „, vol. XXXII, 1911, pag. 154.
(66) MAGNUSSON e SMITH, " Pr. of A. I. E. E. „, vol. XXX, 1911, pag. 989. — V. a. " A. A. E. I. „, vol. XV, 1911, pag. 527.

Digitized by Google

RÉSUMÉ

Si l'on imagine de substituer au réseau compliqué des rails d'un service de tramways une lame métallique continue, disposée symétriquement autour de l'usine génératrice comme centre; si l'on suppose, en outre, que cette lame reçoive le courant sous la forme d'une pluie régulière et constante de filets verticaux, on trouvera que la perte de tension augmentera graduellement de la périphérie au centre sous la double influence de l'augmentation progressive du courant de retour et de la diminution consécutive de la section disponible des conducteurs.

La lame considérée repose sur le sol, lequel n'est pas isolant de sa nature; elle se trouve à quelques décimètres seulement d'un autre entrelacement de conducteurs métalliques que ce sol renferme, et qui est constitué par divers réseaux de tuyaux, câbles et autre que l'on peut, à leur tour, imaginer comme une seconde lame métallique, située dans la profondeur du sol, au-dessous de la première. Dans ces conditions des courants parasites se manifesteront qui se rendront des rails aux réseaux inférieurs, dans la région voisine de la périphérie des lames, et des réseaux inférieurs aux rails, dans la région voisine de l'usine génératrice; et le régime de cette circulation sera tel que la somme totale des courants qui arriveront à chacune des lames considérées sera égale à zéro, et que leur densité sera plus considérable dans la région où la différence de potentiel entre les lames sera plus grande; c'est-à-dire précisément dans la région voisine de l'usine.

Ces courants parasites sont loin de nuire au circuit dont ils dépendent; mais, en revanche, ils sont très préjudiciables aux éléments constitutifs de la lame inférieure dont on vient de parler; ils contribuent à leur destruction plus rapide par les corrosions électrolytiques qu'ils causent; ils troublent le fonctionnement des lignes télégraphiques et téléphoniques par les variations de potentiel qu'ils provoquent dans la terre; ils altèrent les indications des galvanomètres, et plus encore nuisent aux mesures magnétométriques par les champs magnétiques parasites qu'ils induisent.

Digitized by Google

On arrive en partie à neutraliser les effets de ces courants en diminuant la résistance des rails; mais ce résultat s'obtient d'une façon plus efficace quand on a fait, avec grand soin, les jonctions électriques de ces rails et qu'on les a entretenues en parfait état, que lorsqu'on cherche à l'atteindre en installant des conducteurs en cuivre nu en parallèle avec ces mêmes rails. Par contre, on n'a rien obtenu des essais faits pour isoler les rails du sol; des joints isolants sur la longueur des tuyaux qui occupent le sous-sol seraient efficaces, à la condition de les multiplier.

Il serait très utile aussi de ne donner à l'usine centrale d'alimentation qu'un rayon d'action très limité, pourvu toutefois qu'on ait eu soin de relier l'usine sans parcimonie aux rails qui sont situés dans son voisinage, et ceci de préférence au moyen de câbles isolés; cette observation n'a en vue que le réseau urbain proprement dit et ne s'applique pas aux prolongements suburbains qui partent de la périphérie.

L'avantage d'un rayon d'action limité, contrarié par la nécessité ou tout au moins par l'opportunité économique de se borner à une seule centrale d'alimentation, oblige, dans le cas de réseaux étendus, à adopter, quand on le peut, le système de distribution à trois fils, ou bien à établir sur le réseau des centres d'alimentation convenablement déterminés et reliés à la centrale par des câbles bien isolés; ceux-ci étant munis, soit de résistances additionnelles, soit de dynamos auxiliaires, destinées à maintenir tous ces centres au même potentiel.

La littérature de notre spécialité professionnelle, en même temps qu'elle montre que, dès l'origine de la traction électrique, on avait eu conscience des meilleurs procédés à employer pour l'installation et l'exploitation des réseaux de retour de courant des lignes de tramways, révèle que partout et toujours, jusqu'à ces dernières années, on a hésité entre l'application intégrale de ces procédés et celle d'expédients toujours inefficaces.

Les recherches expérimentales n'ont pas fait défaut, à commencer par celles qui ont été instituées dès le début pour évaluer l'importance des dérangements causés aux lignes télégraphiques et téléphoniques et aux laboratoires de physique; de même, des méthodes ingénieuses ont été préconisées en grand nombre pour déterminer les variations de potentiel dans ce qui est représenté ici par deux lames métalliques idéales et pour évaluer l'importance des courants parasites. Le travail que l'on résume ici a eu pour origine des recherches expérimentales de cette nature.

Digitized by Google

Au cours de ces recherches, pour déterminer les variations du potentiel, on s'est servi avec succès des lignes téléphoniques urbaines, et aussi d'un autre procédé qu'on peut à bon droit spécifier par un titre qui en révèle le principe en l'appelant le Système du nivellement électrique des lanternes à gaz d'une ville; ce système offre une compensation automatique des oscillations inévitables des chutes de tension et permet d'établir, dans une ville, un nombre illimité de points de répère qui servent à chacune des mesures successives. Pour l'évaluation de la densité des courants parasites, on a essayé l'emploi de petites lames de plomb qui auraient dû donner par leurs pertes de poids des moyennes indiquant l'ordre de grandeur de ces densités de courant.

Il faut bien avouer qu'aucune des méthodes essayées pour résoudre cette seconde partie du problème de la détermination des courants parasites n'a pu ni ne pouvait conduire à des résultats satisfaisants à l'égard des phénomènes d'électrolyse qui leur sont attribuables, car les corrosions constatées sur les éléments de la lame souterraine se produisent suivant les lignes de moindre résistance, et de la façon la plus capricieuse qu'on puisse imaginer, et leurs effets sont généralement beaucoup plus intenses que la valeur moyenne des densités ne le donnerait à prévoir: c'est pourquoi les revêtements isolants des tuyaux quand ils ne se maintiennent pas continus — et c'est le cas général — ne suffisent pas à les garantir des corrosions.

Il s'ensuit que les règlements de protection, établis comme en Angleterre par l'État, ou comme en Allemagne par une Commission composée de déléguésd es intéressés, n'offrent qu'une garantie limitée, car, à parité de chute de potentiel et de densité moyenne des courants, les effets dangereux varient de gravité avec des circonstances purement locales. Ils ont toutefois d'autre part une valeur indéniable, et à ce point de vue considérable, comme stimulant contre l'apathie éventuelle des entreprises de traction électrique, auxquelles ils demandent des contrôles assidus.

Il est extrêmement difficile de déterminer à priori l'importance des dégâts auxquels un réseau de tuyaux souterrains peut être exposé par l'existence de courants parasites; la situation est pourtant dangereuse toutes les fois que les fluctuations des potentiels déterminent une zone où le danger est possible, et l'examen direct des tuyaux situés dans cette zone révèle des traces de corrosion.

La grande extension prise par les constructions en ciment armé rend plus que jamais nécessaire la surveillance assidue des cou-

Digitized by Google

rants parasites, car dans certains cas les fondations de ces constructions peuvent être sérieusement endommagées par leur action; des recherches faites à cet égard ont démontré que, lorsque l'armature en fer de ces constructions joue le rôle d'anode, l'oxydation du fer augmente assez son volume pour rompre la couche de ciment qui l'entoure; laquelle couche, du reste, même si elle est intacte, ne peut pas être considérée comme un isolant électrique.

Le travail ici résumé démontre que dans l'état actuel du problème des courants parasites, il est de la plus haute importance de mieux discipliner l'installation et l'exploitation des circuits de retour de courant des lignes de tramways, et de les soumettre à une surveillance active et continuelle.

Digitized by Google

Sur quelques calculs pratiques des champs électrostatiques.

VLADIMIR KARAPETOFF

Professeur d'Électrotechnique à l'Univeraité de Cornell (U. S. A.).

Un rapport important sur un système rationnel d'unités électriques proposé par M. G. Giorgi a été présenté, en 1904, par M. Ascoli, au Congrès International d'Électricité, de St.-Louis (1). Ce système, par sa dérivation logique et par sa simplicité pratique, m'intéressa beaucoup, et il y a quelques années que je l'emploie pour le calcul des champs électrostatiques et magnétiques dans les machines et les lignes électriques. L'usage fréquent du système de M. Giorgi a montré sa supériorité réelle sur les systèmes C. G. S., électrostatique et électromagnétique, tant pour l'enseignement des élèves que pour les calculs d'ingénieur et pour les recherches scientifiques.

Je vais présenter quelques exemples de ces calculs, et proposer quelques noms qu'il me paraît utile d'adopter pour les unités dans les applications. L'exposé suivant, qui s'inspire de l'idée principale de M. Giorgi, en diffère cependant par quelques détails. La présente communication n'a pour objet que les problèmes électrostatiques, mais le champ magnétique pourrait être traité d'une manière analogue (2).

(1) Voir *Trans. Intern. Electr. Congress*, St.-Louis, 1904, vol. I, pp. 130 et 136.

(2) Voir V. KARAPETOFF, *The Magnetic Circuit* (McGraw-Hill Company).

Digitized by Google

L'ohm et l'ampère internationaux sont acceptés comme unités fondamentales, quoique arbitraires, au même titre que le mètre, le kilogramme et la seconde. Pour le praticien, leur valeur n'a rien d'absolu, et il ne cherche à leur donner aucune justification abstraite ou philosophique, il lui importe seulement que ces valeurs puissent être reproduites. Il n'y a pas plus d'intérêt pratique à dériver l'ohm et l'ampère d'une certaine théorie des attractions de pôles imaginaires, qu'il n'y en a à dériver le mètre d'une relation supposée avec les dimensions de la terre. Des considérations d'utilité pratique ont fait choisir l'ampère de telle manière, que le watt électrique soit égal au watt mécanique dérivé de l'erg. Le volt est défini comme le produit d'un ampère par un ohm, et le coulomb est la quantité d'électricité qu'un ampère fournit pendant une seconde. La loi des carrés inverses n'est même pas mentionnée.

Pour les besoins de l'ingénieur, les phénomènes électrostatiques doivent être considérés uniquement du point de vue de Faraday, c'est-à-dire comme des forces et des déplacements dans les isolants. La théorie ancienne des actions à distance, des charges sur des conducteurs, des pôles libres arrivant de l'infini, etc., est bannie de l'exposition qui va suivre. Lorsqu'un voltage quelconque est établi entre deux conducteurs, l'isolant qui les sépare est sujet à des tensions électriques, et une quantité d'électricité est déplacée le long des lignes de force. Le déplacement total est le même à travers toutes les surfaces équipotentielles, parce que l'électricité se comporte comme un fluide incompressible. Donc, le déplacement d'électricité ou le flux est mesuré en coulombs (ou micro-coulombs), et la densité du déplacement ou du flux est exprimée en coulombs par centimètre carré.

L'intensité de la force électrique en un point quelconque du champ électrique étant définie le taux de variation du voltage le long d'une ligne de force, il en résulte que le voltage entre deux surfaces équipotentielles est l'intégrale de l'intensité du champ entre ces surfaces. Par conséquent, l'intensité de la force électrique est mesurée en volts (ou kilovolts) par centimètre linéaire.

Avec une configuration donnée des électrodes, le déplacement total d'électricité dans l'isolant est proportionnel à la différence de potentiel entre les électrodes, et le quotient de ces deux quantités est appelé la capacité du condensateur. Au lieu du mot

Digitized by Google

capacité, qui rappelle l'action à distance et suppose des charges sur les surfaces métalliques, l'auteur préfère le mot *permitance* qui accentue le rôle du diélectrique. La permitance d'un condensateur est mesurée en farads, le farad étant défini par le volt et le coulomb. Au lieu du mot condensateur l'auteur propose le mot *permiteur*, qui est analogue aux mots résisteur, conducteur et réacteur qui sont déjà en usage (au moins en Amérique).

La réciproque de permitance ou de capacité pourrait être nommée l'*élastance* d'un condensateur. C'est de même qu'on emploie la résistance ou la conductance selon les cas particuliers. Lorsque les permiteurs sont en parallèle, leur permitance résultante est égale à la somme des permitances partielles; lorsqu'ils sont en série, leur élastance combinée est égale à la somme des élastances partielles. La permitance étant exprimée en farads, l'élastance est mesurée en réciproques de ces farads, et l'auteur s'est permis de les appeler *daraf*, mot qu'on obtient en invertissant le mot farad (par analogie avec ohm et mho).

Un farad étant une unité trop grande pour les besoins ordinaires, le daraf, sa réciproque, en est une trop petite; on utiliserait en pratique les *mégadarafs*, qui sont les réciproques des micro-farads.

La résistance et la conductance d'un centimètre cube d'un métal sont nommées respectivement *résistivité* et *conductivité*; de même, l'élastance et la permitance d'un centimètre cube d'un isolant seraient appelées *élastivité* et *permitivité* (1). Dans la pratique, on les mesurerait en mégadarafs et en micro-coulombs par centimètre cube. Pour l'air, l'élastivité est égale à 11.3×10^6 mégadarafs par centimètre cube, et la permitivité, qui est sa réciproque, est 0.08842×10^6 microfarads par centimètre cube. Pour d'autres isolants la permitivité est plus élevée, et on pourrait l'exprimer par rapport à celle de l'air, de même qu'on exprime parfois la conductivité des métaux par rapport à celle du cuivre. La permitivité relative n'est que la constante diélectrique ordinaire, ou la capacité inductive spécifique.

Avec les quantités et les unités définies plus haut, les divers

(1) Les termes élastance, permitance, élastivité et permitivité ont été introduits par M. O. Heaviside. Voir sa *Electromagnetic Theory*, 1894, vol. I, pag. 28.

Digitized by Google

problèmes pratiques sur les champs électrostatiques seraient traités d'une manière analogue à celle des courants dans les conducteurs, c'est-à-dire, d'une manière familière à tous les électriciens. Les équations principales seraient les suivantes:

1° La permitance d'un permiteur (capacité d'un condensateur à plaques parallèles):

$$C = \varkappa A/l\,, \quad \ldots\ldots (1a)$$

où $\varkappa$ serait la permitivité, A la surface d'une électrode, et l la distance entre les plaques. L'élastance du même permiteur serait:

$$S = C^{-1} = \sigma l/A\,, \quad \ldots\ldots (1b)$$

où $\sigma = 1/\varkappa$ représenterait l'élastivité de l'isolant. Ces deux expressions sont parfaitement analogues aux expressions bien connues de la conductance et de la résistance d'un conducteur cylindrique. Lorsque le champ n'est pas uniforme, les équations précédentes seraient appliquées pour des parties infinitement petites du milieu, prises entre deux surfaces équipotentielles quelconques, assez proches, puis on intégrerait.

2° La densité du flux électrostatique est:

$$D = dQ/dA\,, \quad \ldots\ldots (2a)$$

d'où

$$Q = \int_o^A D.dA, \quad \ldots\ldots (2b)$$

où dQ est le flux électrique à travers un élément dA d'une surface équipotentielle.

3° L'intensité du champ, ou le taux du potentiel, est:

$$F = dE/dl, \quad \ldots\ldots (3a)$$

ou

$$E = \int_o^l F\,dl, \quad \ldots\ldots (3b)$$

où E est le voltage entre un point quelconque du champ et le point considéré; dl est un élément de la ligne de force.

4° La relation entre la densité du flux et l'intensité du champ est la suivante:

$$D = \varkappa F, \quad \ldots\ldots (4a)$$

Digitized by Google

ou bien

$$F = \sigma D. \quad \ldots\ldots (4b).$$

5° Si E est le voltage entre deux surfaces équipotentielles d'un permiteur, et Q le déplacement total:

$$Q = EC, \quad \ldots\ldots (5a)$$

ou bien

$$E = SQ. \quad \ldots\ldots (5b).$$

Ces expressions sont analogues à la loi d'Ohm pour les conducteurs.

6° Des expressions (5*a*) et (5*b*) on déduit, de même que pour les conducteurs, que les permitances sont ajoutées en parallèle, et les élastances en séries; pour traduire ceci en symboles, nous pourrions donc écrire:

$$C_{eq} = \Sigma C, \quad \ldots\ldots (6a)$$
$$S_{eq} = \Sigma S, \quad \ldots\ldots (6b)$$

le souscrit *eq.* signifiant " équivalent „.

7° La densité de l'énergie électrostatique dans un isolant est

$$dW/dV = \frac{1}{2} FD = \frac{1}{2} \varkappa F^2 = \frac{1}{2} D^2/\varkappa, \quad \ldots\ldots (7a)$$

ou bien

$$dW/dV = \frac{1}{2} F^2/\sigma = \frac{1}{2} \sigma D^2, \quad \ldots\ldots (7b),$$

dV étant un élément du volume de diélectrique. Ces expressions sont analogues à celles de l'énergie potentielle dans les corps solides élastiques, et de la puissance convertie en chaleur par centimètre cube d'un conducteur électrique.

Les quantités 4π et 3×10^{10}, qui sont, avec le système C. G. S., la pierre d'achoppement des praticiens, n'entrent point dans les formules précédentes. Il est vrai que ces quantités mystérieuses sont contenues implicitement dans les valeurs de σ et de $\varkappa$ pour l'air, mais cela tient simplement au choix primitif de l'ampère, et nous n'avons pas plus besoin de nous en inquiéter que de l'origine du mètre. Pour l'air, comme pour les autres diélectriques, les valeurs de $\varkappa$ ou de σ sont supposé être cal-

Digitized by Google

culées d'après des essais, et basées sur les valeurs acceptées pour l'unité du courant et la résistance.

Les résultats des calculs dans le système Giorgi ne sont point en unités C. G. S. électrostatiques, ou électromagnétiques, proprement dites: mais simplement en unités du système ampère-ohm, qui est le même pour le champ électrostatique que pour le champ électromagnétique. On n'a plus besoin des deux systèmes d'autrefois. La présence explicite du coefficient $\varkappa$ ou σ, qui caractérise un matériel, est fort avantageuse, particulièrement lorsqu'on veut vérifier les dimensions physiques des deux parties d'une équation. Les exemples suivants feront voir l'avantage du système proposé pour les calculs pratiques [1].

Exemple 1. Application des formules précédentes au cas d'un permiteur (condensateur) composé de deux plaques métalliques de 50×70 cm., séparées par une lame de verre d'une épaisseur de 3 mm.; la permitivité relative du verre, par rapport à l'air, étant 7. Une différence de potentiel permanente de 2400 volts est maintenue entre les plaques. La permitance du permiteur est $7 \times 0.08842 \times 10^6 \times 3500/0.3 = 0.00722$ micro-farad. Son élastance est égale à $1/0.00722 = 138.5$ mégadarafs. Le déplacement total de l'électricité (ou la charge sur les plaques, selon l'ancienne théorie) est $0.00722 \times 2400 = 17.33$ micro-coulombs. La densité du flux dans le verre est $17.33/3500 = 0.00495$ micro-coulomb par centimètre carré. L'intensité du champ est $2400/0.3 = 8000$ volts par centimètre linéaire. La densité de l'énergie dans l'isolant est $\frac{1}{2} \times 0.00495 \times 8000 = 19.8$ micro-joules par centimètre cube. On peut la calculer aussi comme étant l'énergie totale $\frac{1}{2} \times 17.33 \times 2400 = 20.800$ micro-joules divisée par le volume du diélectrique, qui est égal à 1050 centimètres cubes.

Exemple 2. Supposons que l'isolant du permiteur dans le problème précédent soit composé de trois couches de matériaux différents, dont les épaisseurs soient 1.2; 0.7, et 1.1 mm., et les permitivités relatives 2, 3 et 5. On demande de calculer la permitance totale du condensateur. *Solution:* Les élastances des trois couches, par centimètre carré, sont $\frac{1}{2}\,\sigma_a \times 0.12$; $\frac{1}{3}\,\sigma_a \times 0.07$, et

[1] Voir aussi V. KARAPETOFF, *The Electric Circuit* (McGraw-Hill Company).

Digitized by Google

$\frac{1}{5}\sigma_a \times 0.11$, où σ_a est l'élastivité absolue de l'air dont la valeur numérique a été donnée auparavant. En ajoutant les trois élastances en série on trouve que l'élastance totale par centimètre carré est égale à 1.191×10^6 mégadarafs. Donc, la permitance par centimètre carré, qui est sa réciproque, est égale à 0.84×10^6 microfarads. La permitance totale du permiteur est $3500 \times 0.84 \times \times 10^6 = 0.00294$ microfarad.

Exemple 3. Calculer la capacité d'un câble à un conducteur de rayon a, et d'une longueur L kilomètres. Le rayon de l'enveloppe de plomb est a', et la permitivité relative de l'isolant est K. *Solution:* L'élastance d'une couche concentrique de l'isolant, d'un rayon x, d'épaisseur dx et de longueur égale à un centimètre, est $(\sigma_a/\mathrm{K}).dx2\pi x$. L'élastance totale est l'intégrale de cette expression entre les limites a et a'; par conséquent, elle est égale à $(\sigma_a/2\pi\mathrm{K})\ \log_e(a'/a)$. La permitance est la réciproque de cette expression; en changeant les $\log_e$ en logarithmes ordinaires, on trouve, pour une longueur L (en kilomètres), $\mathrm{C} = 0.0241\,\mathrm{KL}/\log_{10}(a'/a)$ microfarads.

Exemple 4. Calculer la permitance d'une ligne aérienne monophasée. *Solution:* On applique le principe de la superposition des systèmes en équilibre, lequel vaut dans la théorie de l'élasticité comme dans celle de l'électrostatique. On considère l'un des conducteurs contenu dans un cylindre concentrique d'un rayon infiniment grand comme un système électrique. Le pôle positif d'une batterie de voltage E est relié au conducteur, le pôle négatif au cylindre. Le second système électrique est composé de même de l'autre conducteur et d'un cylindre concentrique infiniment grand; le pôle positif d'une batterie de même voltage E que la première batterie est en communication avec le cylindre tandis que le pôle négatif est relié au conducteur. Les déplacements électriques vers les deux cylindres sont égaux et de signes contraires, et les deux cylindres coïncident à l'infini; par conséquent, la superposition de ces deux systèmes donne la ligne actuelle avec un voltage de 2E entre les conducteurs. La densité du déplacement dû au premier système, à une distance x du centre du conducteur, est $\mathrm{D}_1 = \mathrm{Q}/2\pi x$, où Q est le déplacement total inconnu, par unité de longueur du conducteur. L'intensité du champ correspondant est $\mathrm{F}_1 = \sigma_a \mathrm{Q}/2\pi x$. Des expressions semblables peuvent être écrites pour le second système. Pour un point sur la ligne droite qui joint les centres des deux conduc-

Digitized by Google

teurs, à une distance x du premier conducteur, l'intensité due au second système est $F_2 = \sigma_a Q/2\pi(b - x)$, où b est la distance entre les centres des conducteurs. On a, selon la définition de F_1 et F_2,

$$2E = \int_r^{b-r} (F_1 + F_2)dx,$$

où r est le rayon des conducteurs. En substituant les valeurs des F et en intégrant, on obtient l'expression bien connue pour la capacité d'une ligne aérienne, quand la distance entre les conducteurs est grande par rapport à leurs diamètres:

$$C = Q/2E = 0.012/\log_{10}(b/r - 1),$$

en micro-farads par kilomètre. Le même procédé est applicable aux lignes polyphasées, avec un nombre quelconque de conducteurs; on introduit un cylindre fictif pour chaque conducteur et on superpose les systèmes séparés. On tient compte du voisinage de la terre par la méthode connue des images électriques, de manière que le nombre actuel des conducteurs est doublé.

Exemple 5. Une couronne est formée, et l'air est ionisé lorsque la densité du flux électrique surpasse 0.0034 micro-coulombs par centimètre carré. On demande de calculer le facteur de sûreté pour éviter la formation de la couronne, sur une ligne de transmission pour laquelle le courant de charge, à 25 périodes, est de 0.12 ampère par kilomètre, et dont les conducteurs ont un rayon de 6 mm. *Solution:* La ligne est chargée pendant un quart d'une période, c'est-à-dire pendant 1/100 d'une seconde. Le courant moyen est $0.12/1.11 = 0.108$ ampère, et le déplacement maximum dans l'air est $0.108 \times (1/100 \times 10^6) = 1080$ micro-coulombs par kilomètre. La surface d'un des conducteurs est de 377.000 centimètres carrés par kilomètre. Par conséquent, la densité du déplacement est $1080/377.000 = 0.002865$ micro-coulombs par centimètre carré, et le facteur de sûreté est $34/28.65 = 1.20$.

La table suivante donne les quantités dont on fait usage dans les calculs d'électrostatique, et, en regard, leur dimensions dans le système proposé.

Digitized by Google

Symbole et Formule	Quantité	Dimension	Nom de l'unité
I	Intensité de courant	$[I]$	Ampère
R	Résistance	$[R]$	Ohm
$E = IR$	Voltage ou différence du potentiel	$[IR]$	Volt
$Q = IT$	Quantité d'électricité, flux électrique, ou déplacement dans le diélectrique	$[IT]$	Coulomb
$D = Q/A$	Densité du flux électrique	$[ITL^{-2}]$	Coulombs par centimètre carré
$F = E/l$	Intensité électrique ou taux du potentiel	$[IRL^{-1}]$	Volts par centimètre linéaire
$C = Q/E = S^{-1}$	Permitance (capacité)	$[TR^{-1}]$	Farad
$S = E/Q = C^{-1}$	Élastance	$[RT^{-1}]$	Daraf
$\varkappa = D/F = \sigma^{-1}$	Permitivité	$[TL^{-1}R^{-1}]$	Farads par centimètre cube
$\sigma = F/D = \varkappa^{-1}$	Élastivité	$[LRT^{-1}]$	Darafs par centimètre cube
$W = \frac{1}{2}EQ$	Énergie	$[I^2RT]$	Joules ou watt-secondes
$W/V = \frac{1}{2}FD$	Densité de l'énergie	$[I^2RTL^{-3}]$	Joules par centimètre cube

Cette table se compare favorablement avec les tables similaires dans les deux systèmes C. G. S.: il n'y a pas d'exposants fractionaires, et la dérivation des formules s'explique d'elle-même.

Les problèmes d'électrostatique, qui demandent une application des fonctions conjuguées ou d'autres méthodes d'analyse, sont résolus dans le système proposé de la même manière que dans les systèmes C. G. S.; l'interprétation des formules est plus facile, leur aspect physique est plus clair, parce qu'aucun coefficient n'est égal à l'unité. Les méthodes que l'on emploie actuellement pour le calcul de la distribution des champs électrostatiques ont été développées principalement au point de vue de l'action à distance. Il est à espérer que les mathématiciens et les physiciens consentiront à appliquer ces méthodes à la théorie des déplacements dans les isolants, et développeront de nouvelles méthodes simples et efficaces. L'ingénieur-électricien a besoin de telles méthodes pour résoudre les nouveaux problèmes, qu'il rencontre de plus en plus fréquemment dans le calcul des appareils pour les tensions très élevées que l'on admet aujourd'hui.

Digitized by Google

Appareil de sûreté pour prévenir les accidents causés par le contact de la haute tension avec la basse tension.

GUGLIELMO NEUHAUS (Milan)

Observations Générales.

Les circuits secondaires à basse tension des transformateurs sont toujours à portée d'un grand nombre de personnes qui, par accident, peuvent venir en contact avec le réseau à basse tension. Ils sont donc menacés d'un grand danger toute fois que pour un motif quelconque la haute tension touche la basse tension.

L'appareil, dont la description ci-dessous, sert à prévenir ces dangers, en interrompant le circuit à haute tension et en mettant à la terre celui à basse tension.

De récents accidents de ce genre ont démontré que toutes ces deux opérations sont indispensables pour arriver à un point de complète sûreté.

L'appareil en question est basé sur l'emploi de 5 *coupe-circuits de tension.* Sous " coupe-circuit de tension „ est compris l'ensemble de 2 armatures métalliques qui serrent entre eux un feuillet de mica muni d'un trou. L'épaisseur du mica dépend de la valeur de la tension capable de faire passer le courant à

Digitized by Google

travers le trou. Finalement, le fonctionnement des coupe-circuits sert à mettre en action un relais lequel fait fonctionner l'interrupteur à haute tension et met à la terre la basse tension et annonce le danger par un signal acoustique.

Description.

L'appareil est triphasé, mais peut être rendu monophasé et biphasé !

Un petit transformateur triphasé, ayant 3 enroulements $b\,b'\,b''$ lesquels représentent les jonctions du systéme triphasé qu'on veut protéger, est inséré sous la conducture à basse tension.

Les 5 coupe-circuits de tension sont raccordés de manière que 2 ($n\,n'$) soient insérés entre chacun des 2 fils et le troisième du système triphasé, et les 3 autres ($p\,p'\,p''$) entre chaque conducteur du système triphasé et la terre.

Le but du dispositif est compris, si l'on pense que le danger puisse être causé :

Ou par une surtension entre les fils et la terre ;

Ou par l'augmentation de la différence de potentiel entre les fils mêmes.

Un relais est inséré entre la terre et le point qui raccorde les 3 armatures $p\,p'\,p''$. Ce relais (type de moteur monophasé à disque en aluminium) est capable de mettre en mouvement, même avec des courants le plus faibles, la pièce q, ce qui établit la fermeture du circuit local en m.

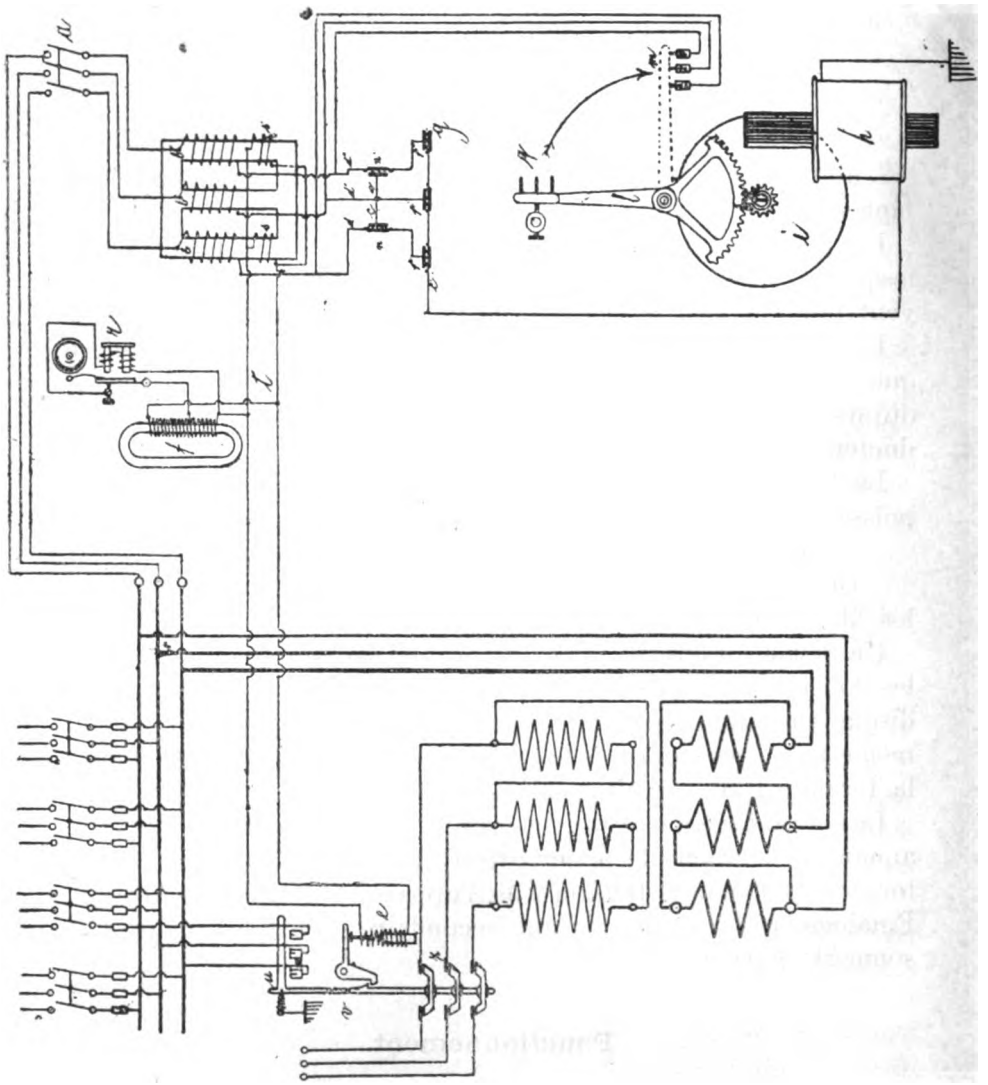
Le courant secondaire du petit transformateur actionne l'électro-aimant e, décroche le levier arrêté, mettant en action et l'interrupteur à haute tension z et l'appareil de mise à la terre u. Finalement, ce même courant secondaire fait fonctionner une sonnerie d'alarme.

Fonctionnement.

1. Surtension entre phase et phase.

Quand la tension jugée dangereuse (ce qui peut être réglé selon l'épaisseur du mica) est atteinte, le courant passe immédiatement aux coupe-circuits $n\,n'$ à travers le trou du feuillet de mica. Le circuit primaire du petit transformateur sera par-

Digitized by Google



Digitized by Google

couru par le courant, de même le circuit secondaire qui met en fonction le solénoïde *e*; par cela, la ligne à haute tension est interrompue et le courant secondaire mis à la terre.

2. Surtension entre une des phases et la terre.

En ce cas les coupe-circuits *p p' p''* entrent en action.

Le courant passe à travers le mica percé du coupe-circuit, mettant en fonction le relais *h*, dont les contacts *m* ferment le circuit primaire du petit transformateur, et par conséquent l'action du solénoïde se répète.

Avantages.

1. L'appareil exécute les manœuvres indispensables pour la protection contre les surtensions des circuits d'alimentation à basse tension, c.-à.-d. l'interruption de la haute tension et la mise à la terre de la basse tension.

2. L'appareil est simple, robuste et peu couteux: condition *sine qua non*, parce qu'alors, même les usines ou centrales les plus modestes, mais pas moins dangereuses, peuvent en être fournies.

3. L'appareil entre en fonction à peine que la surtension dangereuse soit atteinte.

4. L'appareil ne rend l'exercice ni plus compliqué ni plus délicat.

5. L'appareil n'a pas d'enroulements qui soient continuellement sous tension; car ceux-ci n'entrent en fonction qu'au moment du danger.

6. L'appareil ne possède pas de permanentes jonctions à terre (une condition essentielle des autres instruments de ce genre).

7. L'appareil peut être appliqué à toute centrale ou usine sans le moindre changement, une objection qu'on a toujours opposée à tous les dispositifs lesquels, d'une manière ou de l'autre, exigeaient des transformateurs spéciaux ou la modification des transformateurs existants.

8. L'appareil fonctionne aussi en cas de contact avec des lignes croisantes, appartenant à d'autres sociétés. Car, quoique, en ce cas spécial, l'interruption de la haute tension ne puisse empêcher le danger, le circuit pourtant est effectué et le courant à basse tension mis à la terre.

Digitized by Google

9. L'appareil n'est pas sujet aux effets des décharges atmosphériques. Et il faut aussi considérer qu'aux décharges faibles provenant de la basse tension, s'opposent validement les enroulements $b\ b'\ b''$ du petit transformateur fonctionnant comme selfinductions de protection.

10. L'appareil est raccordé avec la ligne qu'il faut protéger, d'une manière stabile et permanente sans l'entremise de fusible, etc.

11. L'appareil ne modifie pas les conditions d'isolement des réseaux.

12. L'appareil n'exige pas d'entretien.

Digitized by Google

RELAIS DE SÛRETÉ

GUGLIELMO NEUHAUS (Milan)

Chaque fois qu'un conducteur à haute tension se casse et tombe, de grands dangers, directs et indirects, se présentent, menaçant particulièrement les hommes qui se trouvent près de la ligne. Le conducteur brisé peut frapper toute personne qui est près de la ligne, ou bien, en pendant vers la terre, peut rester quelque temps à la portée de la main des passants; ou bien peut mettre en contact une ligne à haute tension avec une ligne à basse tension ou avec les circuits téléphoniques courant sur les mêmes poteaux.

Et la probabilité de dangers et d'accidents croît de jour à autre à proportion de l'extension continuelle des réseaux de distribution. Il ne faut pas oublier que toute ligne principale de transport d'énergie amène un réseau étendu de lignes secondaires, qui souvent n'ont pas de grande énergie, mais une tension assez élevée pour devenir dangereuses. Et justement ces lignes modestes, de construction économique et peu surveillées, sont le plus sujettes à des ruptures, etc.

Tous les appareils, installés à présent dans les usines ou centrales, n'ont que le but de protéger les machines et appareils, mais pas de prévenir les dangers provenant de la ligne brisée encore sous tension. Cet état de choses ne peut être imputé à de la négligence, mais il dépend de ce qu'on n'a pas encore trouvé un moyen pratique et économique qui remplisse les nécessaires fonctions protectrices.

Prenez une ligne à haute tension (partant d'une Centrale ou d'une Cabine de transformation), fournie, au commencement, d'un interrupteur automatique à maxima et, à l'autre bout, d'un appareil capable de créer un court-circuit sur la ligne même, toutefois qu'un conducteur se rompe; alors vous obtiendrez un dispositif apte à prévenir les dangers provenant de la rupture d'un conducteur de la ligne.

Digitized by Google

Le commencement de toutes les lignes étant muni d'un appareil d'interruption à maxima, il ne faudra donc que d'appliquer à l'autre bout le nouveau dispositif.

Ayant établi ce fait, allons maintenant faire une description du dispositif capable de créer un court-circuit toute fois qu'un fil se soit brisé.

L'appareil est composé de 2 parties essentielles:

1) Le relais qui ferme un circuit local.

2) L'appareil de court-circuit de la ligne, actionné électriquement par le relais.

Le relais est constitué par 3 groupes électriques identiques, dont chacun est formé par un levier capable d'établir deux contacts, avec pivot *a* sur lequel actionnent le contrepoids *b* et un solénoïde *c*. Si le courant circule dans la bobine, le levier est attiré au contact 2; si le courant manque, le levier, grâce au contrepoids *l*, s'appuie au contact *l*.

Le circuit *d*, dérivé de 2 fils de la ligne secondaire, se fermera chaque fois qu'un des leviers occupe une position différente de celle des autres. La fermeture du circuit *d* met en action l'appareil de court-circuit.

Fonctionnement.

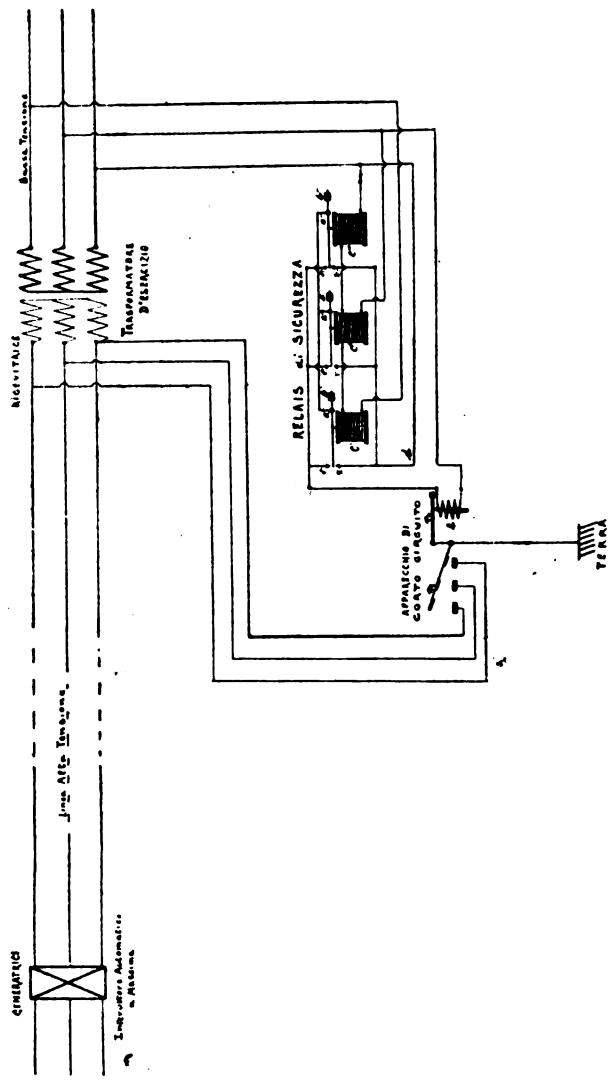
Si un fil de la ligne primaire s'interrompt, p. ex., en *x*, la bobine correspondante du relais reste sans courant et le levier, actionné par le contrepoids *b*, établit le contact en *l*, formant le circuit *d* à travers les 2 autres contacts 2″ et 2‴, restés invariés.

Le courant local, établi en *d*, met en action le solénoïde *l*, lequel, au moyen de *n*, décroche le couteau *m*, créant le court-circuit sur la ligne primaire. C'est justement ce court-circuit qui met en action l'interrupteur à maxima au commencement de la ligne, libérant la ligne brisée du courant.

Le solénoïde *l* est capable de fonctionner aussi en cas qu'il soit interrompu un des fils primaires correspondants aux fils secondaires, entre lesquels il est inséré.

S'il n'y a pas de tension dans aucun des 3 fils, les contacts se trouvent en *l′ l″ l‴*. Si la tension arrive régulièrement par la ligne complète, les contacts assument les positions 2′, 2″, 2‴. Dans tous les 2 cas, le relais ne met pas en action l'appareil de

Digitized by Google



Digitized by Google

court-circuit. Son fonctionnement donc est tel à ne pas déranger les manœuvres ordinaires d'exercice.

Tout l'appareil est simple, sûr, peu couteux, facile à appliquer et ne dérange aucune partie essentielle des centrales.

Conclusions.

Le relais de sûreté est installé dans les sous-centrales ou généralement à la fin de la ligne qu'il faut protéger. Il n'exige aucune modification des constructions existantes, tandis que les autres dispositifs qui servent au même but, exigent un appareil spécial pour tous les poteaux. Monsieur Daguerre, à l'occasion du Congrès d'Électricité de Marseille 1908, a fait la description d'un grand nombre de ces appareils, qui pour la plupart sont construits de manière que la rupture du conducteur cause directement le circuit court. Ou aussi (type Gould) le fil brisé se sépare automatiquement de la ligne et, de cette manière, est mis hors circuit. Mais, en pratique, tous ces systèmes n'ont jamais obtenu que des résultats absolument négatifs. Les solutions, satisfaisantes d'après les apparences, se sont toujours montrées impraticables plus tard, et cela pour les raisons suivantes:

1) A cause des expenses intolérables. Car sur chaque point d'appui de la ligne il faut appliquer un appareil.

2) A cause des complications que ces appareils apportent à la ligne modifiée tout au long et à tout poteau, la ligne protégée, comparée avec une ligne sans protection, devient considérablement inférieure.

Le relais de sûreté, indépendamment de ce que la charge soit complète ou non, fonctionne même en cas que la ligne soit sans ampérage (vide), contrairement aux autres instruments présentés jusqu'à maintenant, qui (moyennant de transformateurs d'intensité) sont alimentés par le courant circulant dans les conductures de ligne.

Le relais de sûreté est robuste, fonctionne très bien et son installation est économique. Il n'est pas influencé par les manœuvres ordinaires d'interruptions de la tension et par les décharges atmosphériques, contre lesquelles sa position le protège complètement.

Digitized by Google

INDICE

SEZIONE I

MACCHINE ELETTRICHE E TRASFORMATORI

Dr. H. BEHN-ESCHENBURG (Oerlikon). — *Carakteristische und mechanische Eigenschaften moderner Generatoren insbesondere solcher höherer Tourenzahl* (Rapporto) . . . . . *Pag.* 3

Discussione: C. SARLI (Berlino). — C. FELDMANN (Delft). — E. J. BRUNSWICK (Parigi). — S. P. THOMPSON (Londra) . . „ 45

P. BOUCHEROT (Parigi). — *Sur les phénomènes électro-magnétiques résultant de la mise en court-circuit brusque d'un alternateur* (Comunicazione) . . . . . „ 49

Discussione: C. FELDMANN (Delft). — E. J. BRUNSWICK (Parigi). — S. P. THOMPSON (Londra). — C. SARLI (Berlino). — A. HALLEUX (Bruxelles) . . . . . „ 91

SILVANUS P. THOMPSON (Londra). — *Motor-Generators, Converters and Rectifiers* (Rapporto) . . . . . „ 94

Discussione: P. BOUCHEROT (Parigi). — E. J. BRUNSWICK (Parigi). — J. L. ROUTIN (Lione). — V. MOUCHARD (Tunisi) 110

Dr. Ing. H. S. HALLO (Karlsruhe i. B.). *Der Kaskadenumformer* (Comunicazione) . . . . . „ 113

Discussione: C. SARLI (Berlino). — E. EICHEL (Berlino) . . „ 122

Digitized by Google

Ing. C. SARLI (Berlino). — *Il motore trifase a velocità variabile, avuto speciale riguardo alla condotta dei laminatoi e delle macchine a carta* (Rapporto) . . . . . Pag. 125

Discussione: R. Legouëz (Parigi). — C. Palestrino (Torino) „ 139

R. LEGOUËZ (Parigi). — *Moteurs polyphasés à collecteur* (Comunicazione) . . . . . „ 140

Ing. GIAMPIETRO CLERICI (Milano). — *Il problema del raffreddamento nei trasformatori di media grandezza* (Rapporto) . . „ 152

Discussione: Leo Finzi (Aachen). — E. J. Brunswick (Parigi). — P. Boucherot (Parigi) . . . . . „ 175

PAUL BUNET (Parigi). — *Le problème de la transformation de la fréquence* (Rapporto) . . . . . „ 179

SEZIONE II

IMPIANTI - CENTRALI - QUADRI - CONDOTTURE

PHILIP TORCHIO (New York). — *The selection of the transmission and distributing voltage, and the design of switchboards and substations in large electric installations, taking into account both economy in first cost and continuity of service* (Rapporto) Pag. 195

STEPHEN Q. HAYES (Pittsburg Pa. U. S. A.). — *Commercial Electrical Apparatus for 100.000 volt service* (Comunicazione) . . . „ 315

E. RAGONOT (Asnières-Francia). — *De la construction et de l'emploi des interrupteurs automatiques* (Rapporto) . . . . . „ 373

Ing. GUIDO SEMENZA (Milano). — *Della marcia simultanea di parecchie Centrali alimentanti uno stesso gruppo di reti* (Rapporto) 419

Discussione: P. Torchio (New York). — H. Dubs (Roma). — U. Del Buono (Roma). — W. Wyssling (Zurigo) . . . . „ 427

Digitized by Google

G. DUMOULIN (Anzin-Nord-Francia). — *Association en parallèle des installations à courant alternatif* (Comunicazione) . . . Pag. 430

Discussione: P. Boucherot (Parigi) . . . . . „ 450

ÉTIENNE DE FODOR (Budapest). — *État actuel de la question de la destruction des ordures en combinaison avec les usines électriques* (Comunicazione) . . . . . „ 451

LOUIS PRAT (Parigi). — *Note sur le problème de la pointe et le tirage mécanique dans les usines électriques* (Comunicazione) . . . „ 480

Discussione: P. Lecler (Châtellerault-Francia). — G. Dehenne (Parigi) . . . . . „ 491

E. HUBER STOCKAR (Zurigo). — *Aluminium für elecktrische Leitungen* (Comunicazione) . . . . . „ 493

Dr. Ing. W. WEICKER (Hermsdorf S. A.). — *Ueberspannungsschutz bei Freileitungs, insbesondere Hänge-Isolatoren* (Comunicazione) „ 547

J. GROSSELIN (Parigi). — *Rapport sur les réseaux souterrains à haute tension reliés métalliquement aux lignes aériennes* (Rapporto) „ 561

Discussione: E. Jona (Milano). — P. Torchio (New York). — Omer De Bast (Liegi). — G. L'Hoest (Bruxelles). — L. Lichtenstein (Berlino). — J. Delon (Lione). — E. Soleri (Torino). — E. Gevaert (Bruxelles). — H. Dubs (Roma) . . . . . „ 571

J. DELON (Lione). — *Sur un procédé et appareil permettant de substituer le courant continu au courant alternatif pour les essais des canalisations électriques avant leur mise en exploitation* (Comunicazione) . . . . . „ 581

Discussione: E. Jona (Milano). — L. Lichtenstein (Berlino) „ 587

Ing. Dr. PHIL. LEON LICHTENSTEIN (Berlino). — *Ueber einige neuere Versuche und Erfahrungen mit Hochspannungskabeln* (Comunicazione) . . . . . „ 591

Discussione: G. G. Ponti (Torino). — J. Delon (Lione) . . „ 614

Ing. ELVIO SOLERI (Torino). — *Attuali limiti di applicazione dei cavi per energia elettrica* (Comunicazione) . . . . . „ 615

Discussione: J. Delon (Lione) . . . . . „ 664

Digitized by Google

Dr. OSUKE ASANO (Tokio). — *Development of Electrical Installations in Japan* (Comunicazione) . . . . . Pag. 667

J. L. ROUTIN (Lione). — *Réglage des Groupes électrogènes* (Comunicazione) . . . . . „ 692

PAUL LECLER (Châtellerault-Francia). — *Quelques applications électrotechniques du ciment armé* (Comunicazione) . . . . . „ 729

SEZIONE III

ISTRUMENTI E METODI DI MISURA
PROTEZIONE DEGLI IMPIANTI - DIVERSI

A. DURAND (Parigi). — *Le compteur électrique - Influence de la nature et des différents régimes de charge - Erreurs - Irrégularités de marche* (Rapporto) . . . . . Pag. 743

C. H. SHARP (New York). — *Electricity Meters with special reference to different kinds of loads* (Rapporto) . . . . . „ 777

Discussione: P. TORCHIO (New York) . . . . . „ 805

JULES NEHER (Ginevra). — *Compteurs électriques à tarifs multiples* (Comunicazione) . . . . . „ 806

Prof. RICCARDO ARNÒ (Milano). — *Watt-voltamperometri elettrodinamici e a induzione* (Comunicazione) . . . . . „ 849

Discussione: H. C. SHARP (New York). — A. BARBAGELATA (Milano) . . . . . „ 859

G. MARTINEZ (Firenze). — *Di alcuni nuovi strumenti elettrici da quadro per corrente alternata* (Comunicazione) . . . . . „ 860

Digitized by Google

Ingg. A. BARBAGELATA e L. EMANUELI (Milano). — *I metodi di opposizione colle correnti alternate e la loro applicazione industriale* (Comunicazione) . . . . . Pag. 871

Discussione: A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). — C. O. MAILLOUX (New York). — H. ARMAGNAT (Parigi). — R. O. HEINRICH (Berlino) . . . . . „ 946

Ing. ALBERTO DINA (Palermo). *Misura delle resistenze di isolamento in un impianto a corrente alternativa durante l'esercizio* (Comunicazione) . . . . . „ 948

Discussione: A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.) . . . . . „ 982

J. L. FARNY (Zurich). — *Sur un nouveau procédé oscillographique à l'aide du tube de Braun* (Comunicazione) . . . . . „ 983

Discussione: A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). — A. LARSEN (Copenhague) . . . . . „ 988

C. O. MAILLOUX (New York). — *Méthode de détermination du courant constant produisant le même échauffement qu'un courant variable* (Comunicazione) . . . . . „ 990

Discussione: A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). — G. CAMPOS (Milano) . . . . . „ 1017

CHARLES PROTEUS STEINMETZ (Schenectady N. Y.). — *The nature of transients in Electrical Engineering* (Comunicazione) . . „ 1019

E. E. F. CREIGHTON (Schenectady N. Y.). — *Protective conditions of Electrical Apparatus in America* (Comunicazione) . . . „ 1056

G. FACCIOLI (Pittsfield Mass. U. S. A.). — *High tension switching phenomena* (Rapporto) . . . . . „ 1104

Discussione: A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). — G. CAMPOS (Milano). — M. PIZZUTI (Napoli). — A. DINA (Palermo) . . „ 1140

Ing. GINO CAMPOS (Milano). — *La propagazione delle sovratensioni oscillatorie* (Comunicazione) . . . . . „ 1143

Discussione: U. DEL BUONO (Roma). — G. FACCIOLI (Pittsfield Mass.). — C. OLIVETTI (Milano) . . . . . „ 1156

Ing. G. GOLA (Torino). — *Sulla protezione degli impianti elettrici* (Comunicazione) . . . . . „ 1158

Discussione: G. CAMPOS (Milano) . . . . . „ 1163

Digitized by Google

Ing. A. DINA (Palermo). — *Su alcuni metodi di prevenzione delle sovratensioni interne* (Comunicazione) . . . . . Pag. 1165

Discussione: A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.) . . . . „ 1173

Ing. M. PIZZUTI (Napoli). — *Sistema di protezione degli impianti dalle sovratensioni* " Scaricatori Sig „ (Comunicazione) . . „ 1175

A. E. KENNELLY (Cambridge Mass.). — *The rotating electric-current field* (Comunicazione) . . . . . „ 1180

Discussione: H. ARMAGNAT (Paris). — A. LARSEN (Copenhague). — G. CAMPOS (Milano) . . . . . „ 1214

Prof. Ing. G. REVESSI (Roma). — *Contributo allo studio delle correnti vaganti* (Comunicazione) . . . . . „ 1215

Prof. VLADIMIR KARAPETOFF (S. U. A.). — *Sur quelques calculs pratiques des champs électrostatiques* (Comunicazione) . . . „ 1245

GUGLIELMO NEUHAUS (Milano). — *Appareil de sûreté pour prévenir les accidents causés par le contact de la haute tension avec la basse tension* (Comunicazione) . . . . . „ 1254

GUGLIELMO NEUHAUS (Milano). — *Relais de sûreté* (Comunicazione) „ 1259

BIBLIOTHÈQUE DE LA VILLE DE LYON

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

SOCIETÀ CERAMICA

RICHARD GINORI

MILANO

CAPITALE SOCIALE

L. 10.000.000

interamente versato

ISOLATORI

IN PORCELLANA DURISSIMA

per Alta e Bassa Tensione :: per Telegrafi e Telefoni

Impianti importantissimi in tutto il mondo

Impianto del Pescara della Società Meridionale di Elettricità di Napoli a:
88.000 Volts

Impianto di Grossotto del Municipio di Milano a:
72.000 Volts

Impianto di Terni della Società Carburo di Calcio di Roma a:
70.000 Volts ecc.

Chiedere Cataloghi alla:

SEZIONE INDUSTRIALE

MILANO - Via Bigli, 21

Digitized by Google

TECNOMASIO ITALIANO BROWN BOVERI

21, Via Castiglia — MILANO — Via Castiglia, 21

Capitale Sociale - 6.000.000 - Interamente versato

ESPOSIZIONE INTERNAZIONALE TORINO 1911

DUE GRANDS - PRIX

Grosso Macchinario costruito nelle proprie Officine in MILANO:

Comune di Milano-Grossotto - 3 Alternatori, ciascuno 12.000 HP.
Società Carburo Calcio - Papigno - 2 Alternatori, ciascuno 9000 HP.
Società Elettrochimica - Il Salto Pescara - 4 Altern. ciascuno 8500 HP.
Società Adamello - Milano - 5 Alternatori, ciascuno 6000-6600 HP.
Il Salto Pescara - 9 Trasformatori, 3600 KVA. 90.000 Volts.
Municipio Milano - 9 Trasformatori, 3000 KVA. 75.000 Volts.
Ferrovie Stato - Sotto Staz. Varesine - 14 Commutatrici 1000 KW.
Ferrovie Stato - Bardonecchia - 3 Motori 2500 HP. ciascuno.
Società Siderurgica - Savona - 1 Motore c. c. per laminatoio 800 HP.
Soc. Elett. Chim. Dr. Rossi - Legnano - 1 Gruppo Motore-Dinamo 750 HP.
Società Edison - Milano - 1 Gruppo Motore-Dinamo 1800 HP.

Potenza delle CENTRALI munite di macchinario costruito esclusivamente a MILANO — 300.000 cavalli

Grossotto - Adamello - Masino - Cassibibile - Pedesalto - Cismon Brenta - Goglio - Papigno - Novara - Pioverna - Alzano Maggiore - Piedimulera - S. Pellegrino - Varzo - Roma - Terni - Forcola - Chiomonte - Bardonecchia - Volturno, ecc. ecc.

Digitized by Google

SOC. AN. COSTRUZIONI ELETTRICHE - BIASCA

TELEFONO: 37-67 - **MILANO** - VIA SENATO, 24

FABBRICHE: SVIZZERA - BIASCA
ITALIA - MILANO

Ing. VITTORIO ARCIONI

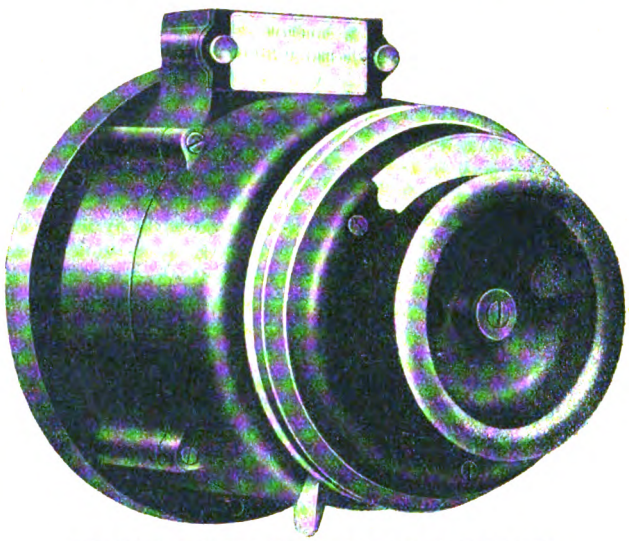
Apparecchio di Protezione

contro i pericoli delle sopratensioni nelle reti secondarie

(Brevettato nei principali Stati)

PREMIATO CON MEDAGLIA D'ORO e L. 8000 al Concorso Internaz. 30 Giugno 1908, bandito dall'Associazione Industriali d'Italia per prevenire gli infortuni sul lavoro — Commissione presieduta dal Prof. G. Kapp (Presidente dell'Assoc. Elettrotecnica Inglese).

Adottato da numerose Società d'esercizio e da numerosi utenti



TIPO PER IL COMANDO MECCANICO DEGLI INTERRUTTORI

Referenze a disposizione * * * Chiedere listino speciale

Si applica con facilità a qualunque impianto esistente, senza spese accessorie o cambiamenti — Offre la più assoluta garanzia d'incolumità per le persone che hanno impianti elettrici.

Altri Prodotti SACEB

Trasformatori - Riduttori - Ventilatori - Teleidrografi - Apparecchi Termo-elettrici

CHIEDERE LISTINI SPECIALI

Digitized by Google

" BERGMANN „

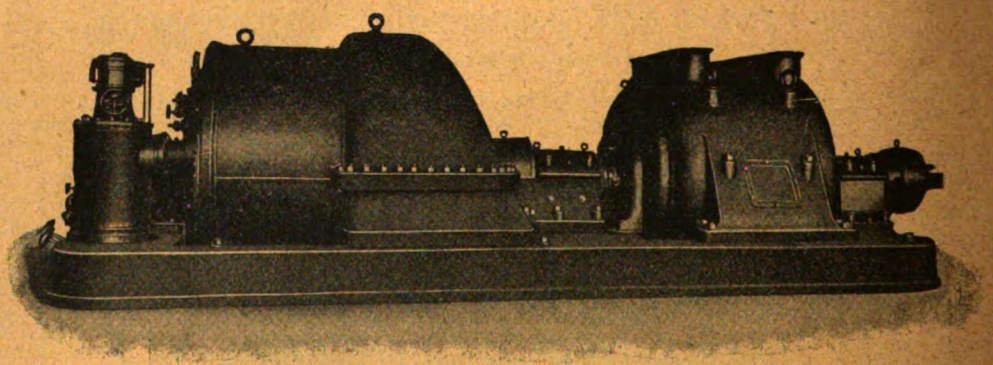
ELEKTRICITÄTS-WERKE A. G. - BERLINO

Rappresentante Generale per l'Italia:

LODOVICO HESS

Via Fatebenefratelli, 15 - **MILANO** - 15, Via Fatebenefratelli

Telegrammi: CONDUIT-MILANO *Telefoni:* 29-67; 41-73; 49-87



Turbogeneratore " BERGMANN „ 10.000 HP.
fornito alla Société Énergie Électrique du Nord de la France, Centrale Wasquehal.

Generatori - Motori - Trasformatori - Turbine a vapore sistema " Bergmann „ - Equipaggiamenti elettrici per Gru, Argani, ecc. - Elettromotori speciali per miniere - Contatori elettrici - Apparecchi di misura, di regolazione e di comando - Tubi originali " Bergmann „ - Materiale d'impianti.

Ufficio Tecnico: PERIZIE, PROGETTI e COLLAUDI

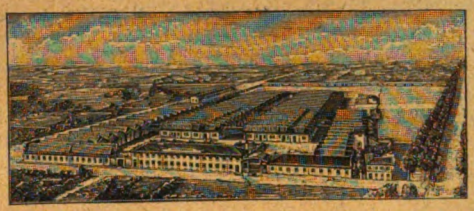
Concessionari Esclusivi per l'Italia Centrale e Meridionale

ALESSANDRO DE POLETTI & C.

ROMA — Piazza di Spagna, N. 20 — ROMA

Telefono N. 73-82. Telegrammi: FULGURA-ROMA.

Digitized by Google

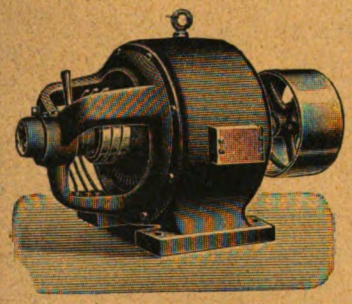


Stabilimenti di SESTO S.T GIOVANNI

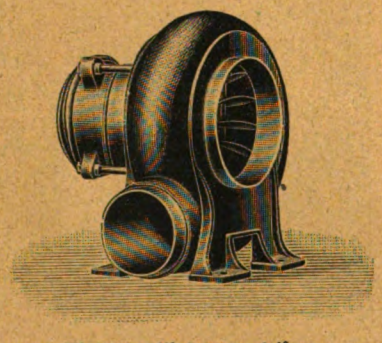
ERCOLE MARELLI & C. - MILANO

Ventilatori - Motori - Pompe - Trasformatori

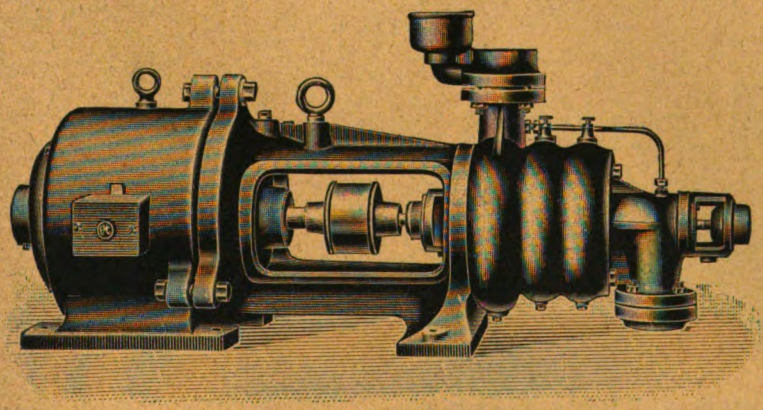
Filiali: TORINO - GENOVA - NAPOLI - PARIGI - BERLINO - VIENNA - LONDRA - BUENOS AIRES



Motore per corrente alternata.



Elettroventilatore centrifugo.



Elettropompa centrifuga ad alta pressione.

Digitized by Google

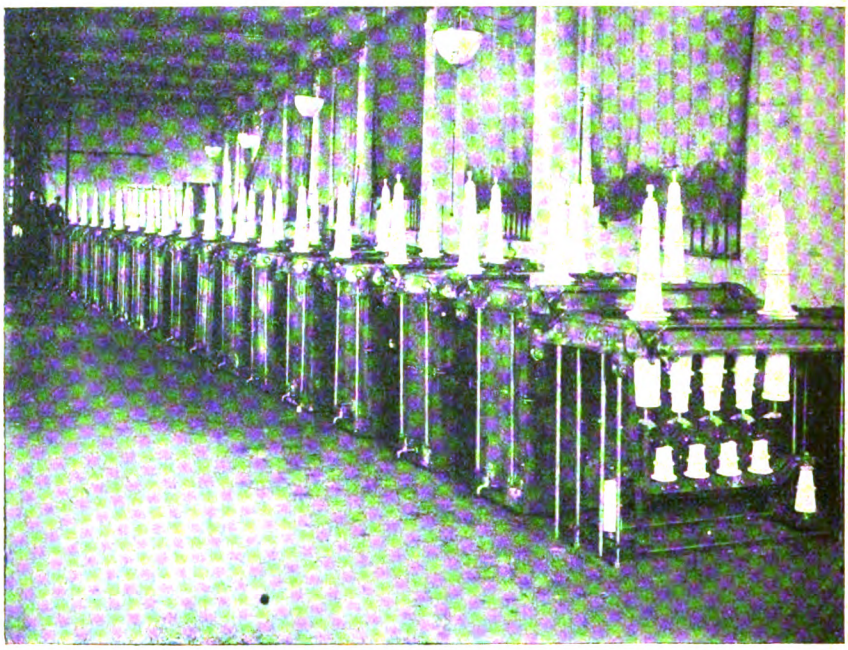
Laboratorio Elettrotecnico

Ing. LUIGI MAGRINI

BERGAMO

Apparecchi e quadri di distribuzione per impianti a

Basse, Alte, ed Altissime Tensioni



Un gruppo di interruttori a 90.000 Volts.

RAPPRESENTANTI

Per l'Italia: Ing. **Dante Fiorini** . . . . . **MILANO,** via Marsala, 13.
Ing. **Aurelio Cortivo** . . . . **ROMA,** via S. Nicola da Tolentino, 50.
Soc. per Impianti Elettrici e Meccanici . **CATANIA,** via Umberto I, 50.

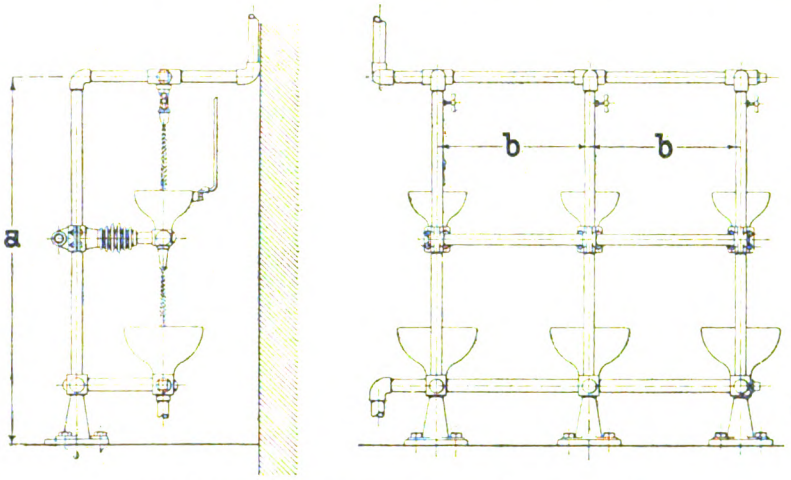
Per il Belgio: Ing. **Georges Vandamme** . . **BRUXELLES,** rue Pierre Decoster, 31.

Digitized by Google

Telefono N. **6-76.** Telegrammi: ***Fantini-Bergamo.***

OFFICINE ELETTROTECNICHE BERGAMASCHE A. FANTINI & C.

Via dei Mille, 8 - **BERGAMO** - *8, Via dei Mille*



Scaricatore a getto d'acqua per alte ed altissime tensioni.

Onorificenze
ALLE
Esposizioni:

BRESCIA
Medaglia d'Oro

MARSIGLIA
Medaglia d'Oro

TORINO
Diploma d'Onore

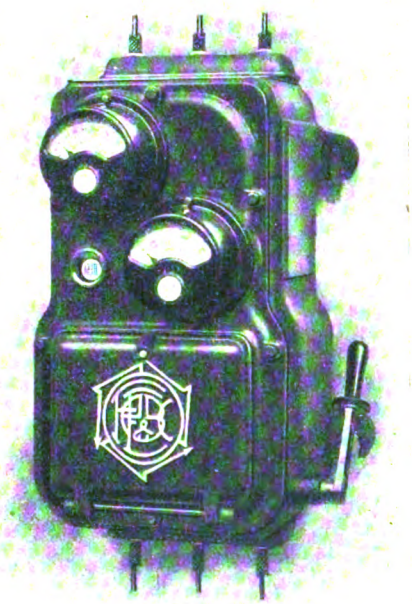
Costruzione e montaggio di quadri per centrali, stabilimenti e cabine di trasformazione

Apparecchi elettrici da quadro e da linea, automatici ed a mano per tensioni sino a 70000 Volts e per intensità sino a 5000 Amp.

Protezione degli impianti contro le sovratensioni e le scariche atmosferiche.

Limitatori di corrente per impianti a forfait *di luce e forza*

→ Cataloghi e Preventivi gratis a richiesta ←



Quadro a cofano con interruttore automatico di massima intensità e minima tensione.

Digitized by Google

Società Anonima Ing. V. TEDESCHI & C.

TORINO

Conduttori isolati di ogni tipo per impianti elettrici

Cavi sotterranei e subacquei per trasporto di energia elettrica.

Installazione di prova 240.000 Volts.

Cavi aerei, sotterranei e subacquei per telegrafia, telefonia e segnalazioni a distanza.

Conduttori per macchine ed apparecchi elettrici con isolamento in seta, smalto, cotone.

Cordoni per apparecchi telefonici e tavole di commutazione.

Corde di ferro e di acciaio per sospensioni di cavi ed applicazioni meccaniche.

Materiali isolanti — Accessori di posa per ogni tipo di cavo.

2 GRANDS PRIX — Bruxelles 1910 — Fuori Concorso - MEMBRO GIURIA
2 GRANDS PRIX — Buenos Aires 1910 — Torino 1911

MEDAGLIA D'ORO SPECIALE del Ministero d'Agric., Indust. e Comm. - Torino 1911.

Digitized by Google

SOCIETÀ ITALIANA

WESTINGHOUSE

Anonima — Sede in VADO LIGURE

Capitale L. 10.000.000 — Emesso e versato L. 4.000.000

Direzione, Uffici tecnici Centrali, Amministrazione e Officine proprie in **VADO LIGURE**

Materiale Elettrico in genere
Trasformatori - Materiale di Trazione Elettrica - Commutatrici
Turbine a Vapore - Condensatori Westinghouse - Leblanc
Motori a Gas - Costruzioni Metalliche.

RAPPRESENTANZE NELLE PRINCIPALI CITTÀ D'ITALIA

Uffici tecnici dipendenti in { ROMA: Vicolo Sciarra, 54 (Telefono 1).
MILANO: Piazza Castello, 9 (Telefono: 80).

VEDOVELLI PREISTLEY & C.IE

Ateliers de Constructions Électriques

160, 162, 164, Rue S.t Charles — PARIS (XV)

GRANDS PRIX: Paris 1900 — Arras 1902 — Tourcoing 1905 — Marseille 1908 — Turin 1911
Hors Concours, Membre du Jury: Bruxelles 1910

APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE POUR TABLEAUX DE DISTRIBUTION ET POUR LIGNES DE TRANSPORT DE FORCE - BASSE ET HAUTE TENSION - PANNEAUX MONOLITHES ET CLOISONNEMENTS EN « ALABASTRINE » POUR LA HAUTE TENSION.

MATÉRIEL POUR TRACTION ÉLECTRIQUE POUR TRAMWAYS ET CHEMINS DE FER PAR COURANT CONTINU, MONOPHASÉ ET TRIPHASÉ - BASSE ET HAUTE TENSION PAR TROLLEY, PAR TROISIÈME RAIL, PAR CONTACTS, PAR CANIVEAUX, ETC.

ENTREPRISES SPÉCIALES

LETTRES LUMINEUSES - FONTAINES LUMINEUSES - CHÂTEAUX D'EAU

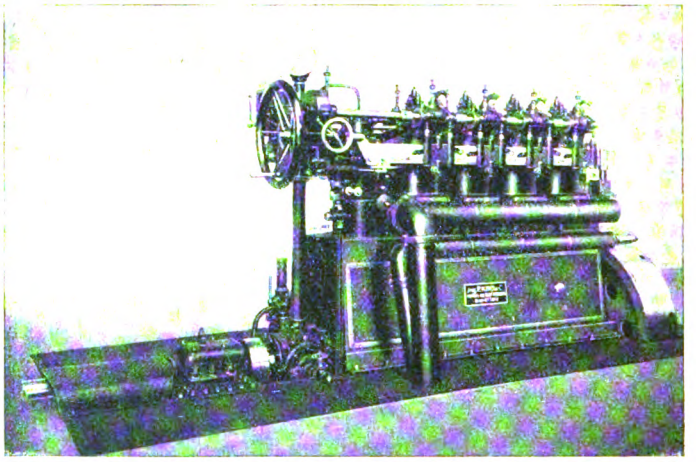
AGENCES { **Angleterre: LAING, WHARTON Ltd.** 7, Great Newport St. - **LONDON W. C.**
Italie . . : GUIDO SAMAJA & C., Via Meravigli, 10 - **MILANO**
Belgique : RENIER & C.ie, 37, Rue E. Bouillot - **BRUXELLES**

Digitized by Google

MOTORI KIND

A COMBUSTIONE GRADUALE
INTERNA DI OLII PESANTI

Esposizione Internazionale di Torino 1911



Diploma d'onore e Medaglia d'oro

Motore Marino Reversibile ***Kind*** - 100 cavalli effettivi.

MOTORI MARINI REVERSIBILI

da 40 a 3000 HP e più.

Lenti e Rapidi - Pesanti, Leggeri, Extra-Leggeri fino a 17 Kg.
per HP eff. asse - Massima Rapidità e Sicurezza d'Inversione garantita
da 2 a 5 secondi - Minimo Consumo di Combustibile.

Motori Fissi - Gruppi Elettrogeni

di Bordo, per Centrali Elettriche, per Impianti Industriali

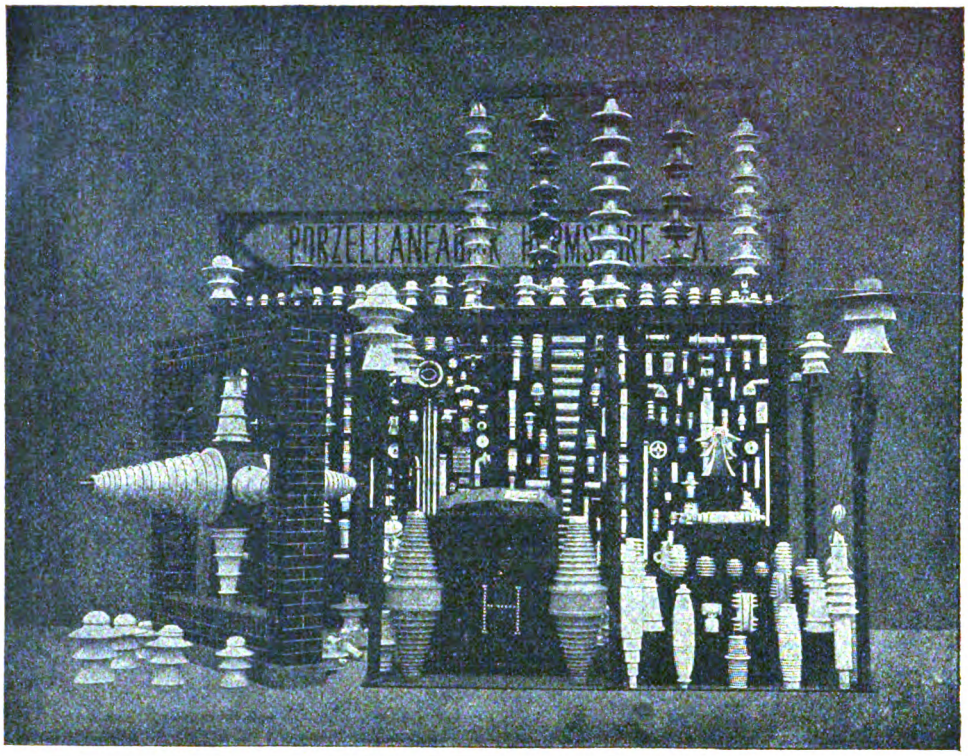
Fornitori della R. Marina Italiana

CONSUMO DI COMBUSTIBILE DA 1 A 2 CENT. PER CAV. ORA

ING. P. KIND & C.°

CORSO DANTE 38
TORINO

Digitized by Google



Ausstellungsstand auf der Ausstellung Turin 1911.

GRAND PRIX — Marseille 1908
" " — Brüssel 1910
" " — Turin 1911

Für Hochspannung-Isolatoren

PORZELLANFABRIK

HERMSDORF SACHS. - ALTENB. DEUTSCHLAND

Vertreter für Italien:

Heinrich Jüngermann *Mailand* Via Melchiorre Gioia, N. 1.

Digitized by Google

Bruxelles 1910 → GRANDS PRIX ← Turin 1911

INSTRUMENTS ÉLECTRIQUES

INSTRUMENTS DE PRÉCISION:

Wattmètres

—

Voltmètres électrostatiques

—

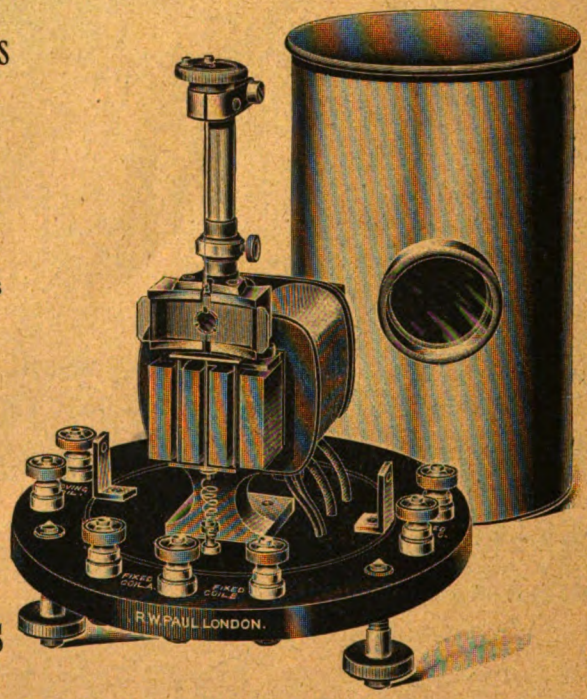
Étalons d'inductance

—

Résistances de gaze, sans capacité

—

PYROMÈTRES



INSTRUMENTS PORTATIFS

de 10^{-7} amp.

—

Oscillographes

—

Galvanomètres à vibration

—

UNIPIVOTS

ÉLECTRODYNAMOMÈTRE A RÉFLEXION

(*Sensibilité moins d'un microvolt*).

Spécialités pour la mesure des courants alternatifs, aussi bien de haute fréquence, et d'inductances et capacités.

ROBT. W. PAUL

NEW SOUTHGATE, LONDON, N.

COMPTOIRS { LONDON - 33, LEICESTER SQUARE, W. C.
NEW YORK - 1, EAST 42ND. STREET

Digitized by Google

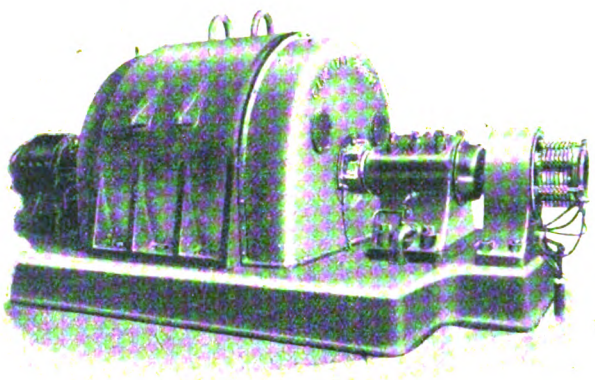
SOCIÉTÉ ANONYME d'ÉLECTRICITÉ

GANZ

BUDAPEST

STATIONS CENTRALES
TRANSPORTS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE
A HAUTE TENSION
TURBOGÉNÉRATEURS

TRACTION ÉLECTRIQUE



ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

MOTEURS POUR GRANDES PUISSANCES
MOTEURS A HAUTE TENSION
PETITS MOTEURS
TRANSFORMATEURS

SOCIÉTÉS FILIALES A VIENNE ET MILAN

Digitized by Google

A.E.G. - THOMSON HOUSTON

SOCIETÀ ITALIANA D'ELETTRICITÀ

Capitale L. 9.000.000 interamente versato.

Materiale elettrico in genere

Materiale per trazione elettrica

Trasformatori - Convertitori - Dinamo e Turbodinamo a corrente continua ed alternata - Turbine a Vapore - Impianti di trazione, d'illuminazione e da miniera - Trasporti d'energia.

Sede e Direzione - Riparto Trazione: MILANO, 4, Piazza Castello - Telef. 20-26
Direzione Impianti Luce e Forza: ROMA, 3, Piazza Borghese - Telef. 91-60
Fabbrica e Officine di Riparazione: MILANO, 40, via Borgognone - Tel. 19-40 e 27-32

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google